

# 長時間の風外力と長周期地震動における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験および解析手法の提案

東京工業大学 杉山 暢方

## 1 はじめに

粘弾性ダンパーは、振動時に吸収した振動エネルギーを熱に変換し、温度が上昇する。その温度上昇に伴い、ダンパーの抵抗力が低下する特性を有している（温度依存性）。また、風や長周期地震動は継続時間が長いため、粘弾性ダンパーの温度上昇量は大きくなり、ダンパーへの影響が懸念される。以上のことから、長時間の風外力や長周期地震動に対する粘弾性ダンパーの性能評価が求められている。

長時間のランダム波で実大実験を行うことは、ランダム波の作成が非常に煩雑であることに加え、実験装置の性能上困難な場合が多い。また、粘弾性ダンパーの動的特性を評価するためには、これまで一般的に行われてきた一定振幅・振動数による実験方法が有用である。既往の研究では、小型の粘弾性ダンパーを対象とし、長時間の正弦波および風応答波の加振実験が行われ、動的特性の変化に加え、正弦波を用いて風応答時におけるダンパー特性の変化を評価する手法（正弦波置換法）の有効性が確認されている<sup>1)</sup>。また、熱伝導・伝達による放熱を再現できる解析モデルが提案されているが、複層の実大粘弾性ダンパーには適用できない<sup>2)</sup>。そこで本研究では、実大粘弾性ダンパーを対象とした加振実験を行い、長時間の風外力と長周期地震動による温度・動的特性の変化を把握するとともに、正弦波置換法の実大粘弾性ダンパーに対する適用性を検証する。また、既往の解析モデルを拡張し、本実験により得られたダンパーの温度上昇と動的特性の変化を再現できる解析手法を提案する。

## 2 風応答波と置換正弦波加振実験の実験概要

### 2.1 試験体および計測概要

本研究では、ダンパー長さ  $L = 4024.5\text{mm}$ 、層せん断面積  $A_s = 9.12 \times 10^5\text{mm}^2$ 、粘弾性体の厚さ  $t = 8\text{mm}$ 、粘弾性体積層数  $n = 6$  の実大粘弾性ダンパーを試験体として用いる。図1に本実験の試験体セットアップを、図2に計測箇所一覧を示す。図1、図2に書かれている数字は歪・温度における計測チャンネルの番号である。歪はA-A'断面で6箇所計測し(①～⑥)、温度はB-B'断面で12箇所、C-C'断面で10箇所とダンパー周辺温度の計23箇所(□1～□26)で計測した。

### 2.2 風応答波作成手順および実験ケース

時刻歴応答解析を行う際に解析モデルに与える風

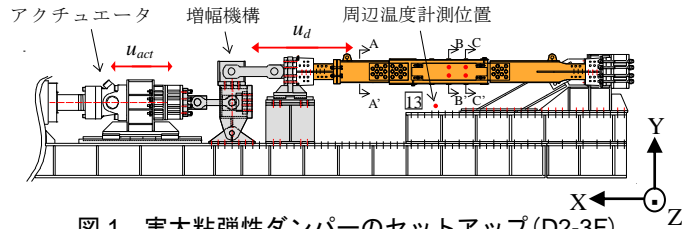


図1 実大粘弾性ダンパーのセットアップ (D2-3F)

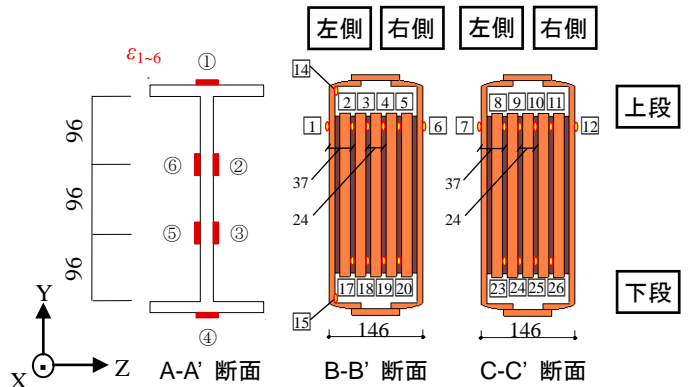


図2 試験体断面および歪・温度計測位置 (単位: mm)  
(温度の計測チャンネル番号のうち、□16, □21, □22 は欠番)

力時刻歴波形は、高さ 200m、幅・奥行きが等しく 50m の建物を想定し、再現期間 500 年、粗度区分を III としたパワースペクトル密度 (PSD) と一致するよう作成されている。解析モデルは、固有周期  $T_0 = 3$  秒 ( $f_0 = 0.33\text{Hz}$ ) に対して、減衰定数  $\zeta_0$  を 2%、10% とした 2 種類の 1 質点モデルを使用し、モード系を用いて層間変形を算出した。この解析モデルに風方向および風直交方向の風力時刻歴波形を入力し、時間刻み  $\Delta t = 0.01$  秒で時刻歴応答解析を行った。その後、ダンパー最大変形が 16mm 程度の時刻歴波形を得るために、得られた変形時刻歴波形を、標準偏差  $\sigma_u = 4.0\text{mm}$  でそれぞれ基準化した。解析は風方向、風直交方向ともに 750 秒 (1 区間) とした。

以上より得られた風応答波 1 区間分の変位時刻歴を図3、風応答波におけるダンパー変形の諸元を表1に示す。ここで、表中の A = 風方向 (Along direction)、C = 風直交方向 (Across direction)、L = 低減衰 ( $\zeta_0 = 2\%$ , Low damping)、H = 高減衰 ( $\zeta_0 = 10\%$ , High damping)、数字は 1 質点モデルの固有周期を意味する。また、 $N_0^+ = 750$  秒間で変形波形がゼロ軸を正の傾きで超える数 (以下、繰返し数)、PF = ピークファクター (= 最大値 / 標準偏差) である。

表2に風応答波載荷時間を示す。ここで、実載荷時間  $t_L'$  とは、実際に行った加振時間を意味する。平衡時

間  $t_e$  とは、ダンパー温度が周辺温度  $\theta_c$  と等しくなるまでの時間を表す。載荷時間  $t_L$  は実載荷時間から平衡時間を引いた値である。

表 1 風応答におけるダンパー変形の諸元

Case	$u_d$ Max (mm)	$u_d$ Min (mm)	$\sigma_u$ (mm)	$N_0^+$	P.F.
A-3L	17.7	-14.1	4.0	208	4.42
A-3H	18.5	-12.7	4.0	107	4.64
C-3L	17.2	-15.9	4.0	173	4.29
C-3H	15.4	-15.2	4.0	108	3.85

表 2 風応答波載荷時間

Case	ダンパー			
	周辺温度 $\theta_c$ (°C)	実載荷時間 $t'_L$ (sec)	平衡時間 $t_e$ (sec)	載荷時間 $t_L$ (sec)
A-3L	26	30,000	1,878	28,122
	30	28,800	3,778	25,022
A-3H	24	32,400	2,348	30,052
	28	32,400	6,858	25,542
C-3L	28	30,000	3,046	26,954
	24	32,400	2,048	30,352
C-3H	28	32,400	5,276	27,124

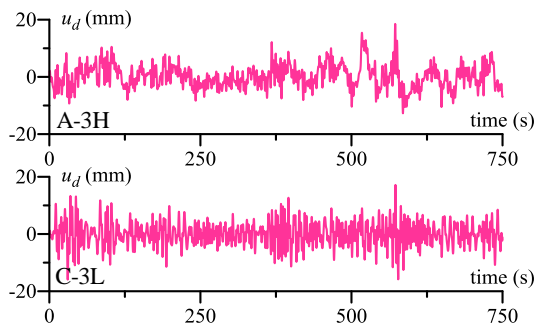


図 3 風応答波の変位時刻歴 (1 区間分)

## 2. 3 貯蔵剛性と粘性係数の算出方法

貯蔵剛性  $K'_d$  はダンパー変形  $u_d$  -ダンパー力  $F_d$  の履歴ループの傾きを表し、式(1)の最小二乗法により求めた<sup>3)</sup>。また、風応答時のダンパーの等価な粘性係数  $C_d$  はダンパー変形を微分して算出したダンパー速度  $\dot{u}_d$  -ダンパー力  $F_d$  の履歴ループの傾きを意味し、式(2)の最小二乗法により求められる<sup>1)</sup>。

$$K'_d = \frac{n \sum u_{d,i} F_{d,i} - \sum u_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum u_{d,i}^2 - (\sum u_{d,i})^2} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{n \sum \dot{u}_{d,i} F_{d,i} - \sum \dot{u}_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum \dot{u}_{d,i}^2 - (\sum \dot{u}_{d,i})^2} \quad (2)$$

ここで、 $\Sigma$  は総和記号で、履歴の  $n$  個の  $u_{d,i}$  または  $\dot{u}_{d,i}$  と  $F_{d,i}$  を対象とする。貯蔵剛性、粘性係数共に、実載荷時間の開始時間から 1,000 秒ごとに 400 秒間計測した履歴から算出している。次章以降で示す  $K'_d$  と  $C_d$  の時刻歴図には代表値として、3,000 秒ごとの履歴から算出した値を示している。

## 2. 4 風応答波の正弦波置換法

置換振動数  $f_r$  および置換振幅  $A_r$  は、風応答波のダンパー変形の繰り返し数  $N_0^+$ 、継続時間  $t_a$  およびダンパー応答の標準偏差  $\sigma_u$  を用いて次式より算出される。

$$f_r = N_0^+ / t_a, \quad A_r = \sqrt{2} \sigma_u \quad (3a, b)$$

以上の方法により風応答波の置換振幅および置換振動数を求め (表 3)、置換正弦波加振実験を行った (表 4)。

表 3 風応答波の置換正弦波の諸元

Case	$A_r$ (mm)	$f_r$ (Hz)	$u_d$ Max (mm/s)
A-3L		0.277	9.84
A-3H (C-3H)	5.66	0.142	5.05
C-3L	5.66	0.230	8.18

表 4 風応答波の置換正弦波載荷時間表

Case	ダンパー周辺温度 $\theta_c$ (°C)	実載荷時間 $t'_L$ (sec)	平衡時間 $t_e$ (sec)	載荷時間 $t_L$ (sec)
A-3L	26	24,000	1,204	22,796
	30	28,800	2,936	25,864
A-3H (C-3H)	24	32,400	1,414	30,986
	28	30,000	5,058	24,942
C-3L	28	30,000	2,660	27,340

## 3 風応答波と置換正弦波加振実験の実験結果

図 4 に置換正弦波による実験により得られた B-B' 断面左側上段の温度時刻歴を風応答波実験の結果に重ねて示す。図 4 に加え、全ての実験ケースにおいて両実験での最高温度の差は 2°C 以下であることが確認できた。

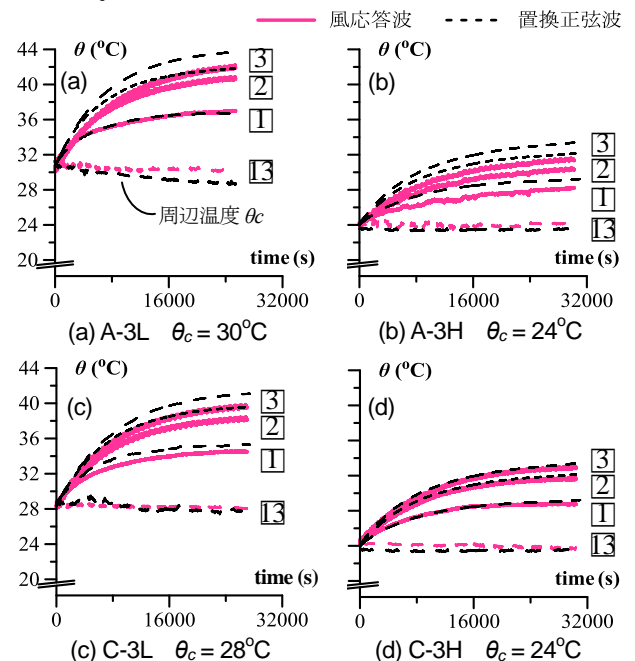


図 4 B-B'断面左側上段 風応答波と置換正弦波の温度時刻歴

図 5 に風応答波と置換正弦波による実験により得られた、貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の時間変化を重ねて示す。図 5(a), (c), (d) から、A-3L C-3L, C-3H において、風応答波実験と置換正弦波実験で  $K'_d$  と  $C_d$  の差は最大でも 1 割程度となっており、概ね一致している。一方、図 5(b) より、A-3H 実験において置換正弦波実験での  $K'_d$  の値がランダム波実験より最大で約 1.2 倍、 $C_d$  が約 1.3 倍と A-3L 実験に比べて高いことが確認できる。これは風力の準静的成分（低振動数成分）の影響によるものと考えられる。

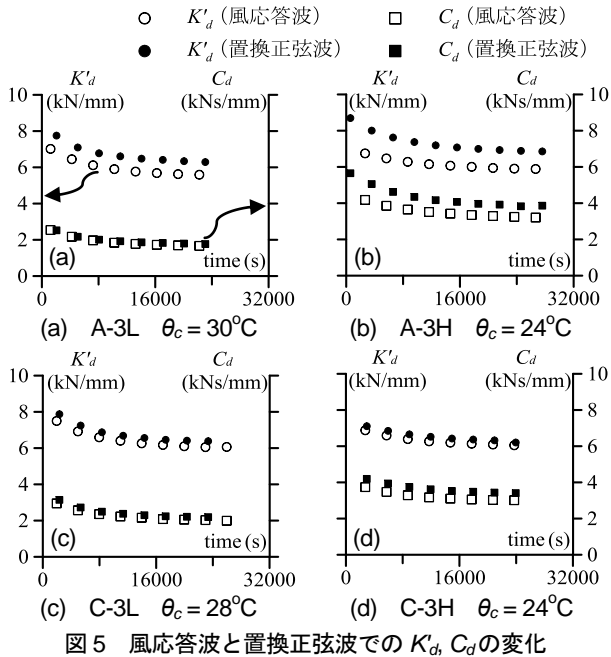


図 5 風応答波と置換正弦波での  $K'_d$ ,  $C_d$  の変化

以上のことから、風方向かつ建物の減衰が大きい場合において、多少の誤差が生じるものの、正弦波置換法によって決定した振幅と振動数を用いた正弦波実験を行うことで、置換正弦波と風応答波実験により得られた温度上昇、 $K'_d$  と  $C_d$  は概ね良い対応を示していることが確認できる。

#### 4 地震応答波および置換正弦波加振実験

実験に用いる地震応答波は、超高層建物を想定した多質点系モデルを用い、継続時間の長い長周期地震動の 1 種である三の丸波を入力波とした時刻歴応答解析を行い、得られた多質点系モデルの層間変形の中で最大の層間変形を（約 1/100）、ダンパーの軸方向変形に変換して用いた。

地震応答波の置換正弦波は、風応答波の場合と異なり、継続時間には実効地震継続時間  $t_0$  を用いる必要がある<sup>4)</sup>。 $f_r$  および  $A_r$  は、地震応答波のダンパー変形の繰り返し数  $N_0^+$ 、 $t_0$  およびダンパー応答の標準偏差  $\sigma_u$  を用いて次式より算出される。

$$f_r = N_0^+ / t_0, \quad A_r = \sqrt{2} \sigma_u \quad (4a, b)$$

以上により、地震応答波の置換正弦波の諸元は、 $A_r = 24.96\text{mm}$ ,  $f_r = 0.350\text{Hz}$ ,  $N_0^+ = 23$ ,  $t_0 = 65.8\text{sec}$  となった。

図 6 に地震応答波実験で計測されたダンパー変位の時刻歴を、図 7 に置換正弦波による実験により得られた B-B' 断面左側上段の温度時刻歴を地震応答波実験の結果に重ねて示す。図 8 より、地震応答波におけるダンパーの温度上昇は  $t_0$  内が大部分を占めており、それ以外の時間ではほとんど上昇しないことが分かる。また、置換正弦波実験は地震応答波実験と同等の温度上昇を示しており、継続時間の長い長周期地震動においても正弦波置換法の有効性が確認できる。

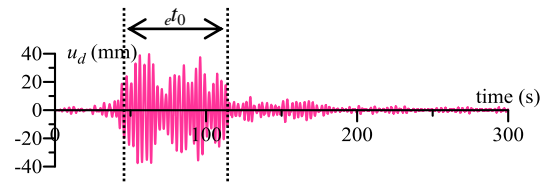


図 6 地震応答波の変位時刻歴

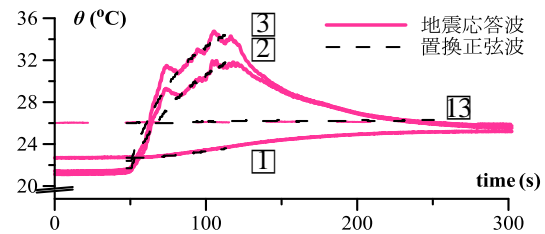


図 7 B-B' 断面左側上段 地震応答波と置換正弦波の温度時刻歴

#### 5 解析モデルの拡張および実験との比較

本解析モデルに用いる分数微分構成則は、粘弾性体に歪が与えられたときに発生する応力を式(5)で示される<sup>5)</sup>。

$$\tau(t) + aD^\alpha \tau(t) = G[\gamma(t) + bD^\alpha \gamma(t)] \quad (5)$$

ここで、 $D^\alpha$  は分数微分演算子、 $\alpha$  は分数微分の次数であり、 $a, b, \alpha, G$  が粘弾性体の温度・振動数依存性を評価する係数となる<sup>5)</sup>。係数  $b$  を大きくすると  $K'_d$ ,  $C_d$  が大きくなる。また、係数  $G$  は  $K'_d$  を比例的に増減させる<sup>5)</sup>。置換正弦波加振実験により長時間の繰返し载荷による  $K'_d$  と  $C_d$  の変化が見られたため、本論文では式(6)~(7)から算出される  $\lambda_3, \lambda_4$  を係数  $b, G$  に乗じることで繰返し载荷による  $K'_d$  と  $C_d$  の変化の再現を提案する。

$$\lambda_3^{(n)} = c_5 \sum E_d^{(n)} + 1 \quad (\lambda_3^{(n)} \leq 1.7) \quad (6)$$

$$\lambda_4^{(n)} = c_6 \sum E_d^{(n)} + 1 \quad (\lambda_4^{(n)} \geq 0.78) \quad (7)$$

ここで、 $\sum E_d^{(n)}$  は  $n$  ステップ時までのエネルギー吸収密度の累積値であり、 $c_5, c_6$  はそれぞれ  $2.126 \times 10^3$ 、 $-6.091 \times 10^4$  とした。 $n+1$  ステップ時の粘弾性体の温度  $\theta_d^{(n+1)}$  は、吸収エネルギー密度に比例した温度上昇量と熱の伝導・伝達による温度の低下量  $\theta_v^{(n)}$  の関係から式(8)の様算出される。



$$\theta_d^{(n+1)} = \theta_d^{(n)} + E_d^{(n)} / s\rho - \theta_v^{(n)} \quad (8)$$

ここで、 $s\rho$  は比熱と密度の積である。 $\theta_v^{(n)}$  は次式で算出できる。

$$\theta_v^{(n)} = \alpha_{CV}^{(n)} (\theta_d^{(n)} - \theta_c) \quad (9)$$

本論文では式(9)の中の  $\alpha_{CV}^{(n)}$  を放熱係数と定義し、次式のようにモデル化した。

$$\alpha_{CV}^{(n)} = c_7 E_d^{(n)} / (1 - \theta_c / \theta_d^{(n)}) \quad (10)$$

ここで、 $c_7$  は放熱量を決める係数であり、全ての実験結果から  $c_7 = 0.0135$  とした。

風の置換正弦波加振実験における実験結果と解析結果での  $\theta_d^{(n)}$  の比較を図8に、 $K'_d$  と  $C_d$  の比較を図9に示す。図8と図9より、A-3L、C-3Lともに本解析は実験で得られた  $\theta_d^{(n)}$ 、 $K'_d$ 、 $C_d$  を概ね再現できていることが分かる。

風応答波加振実験における実験結果と解析結果での  $\theta_d^{(n)}$  の比較を図10に、 $K'_d$  と  $C_d$  の比較を図11に示す。図11より、A-3L、C-3Lともに解析値での  $K'_d$  の値は実験値より最大で約1.2倍高いが、図10と図11より、A-3L、C-3Lともに本解析は実験で得られた  $\theta_d^{(n)}$ 、 $C_d$  を概ね再現できていることが確認できる。

## 6 まとめ

本研究は、複層の実大粘弾性ダンパーを対象とした加振実験を行い、長時間の風外力と長周期地震動による温度・動的特性の変化を把握するとともに、正弦波置換法の実大粘弾性ダンパーに対する適用性を検証した。また、実験により得られたダンパーの温度上昇と動的特性の変化を再現できる解析手法を提案した。

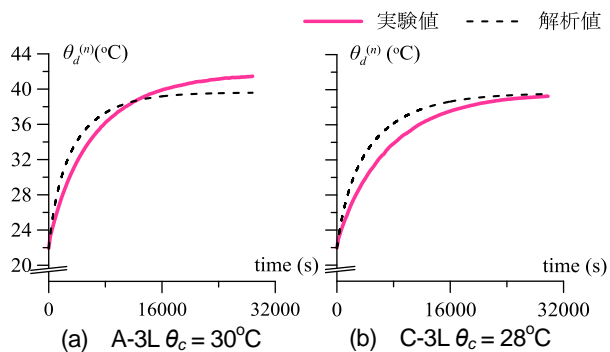


図8 置換正弦波での温度時刻歴の実験値と解析値の比較

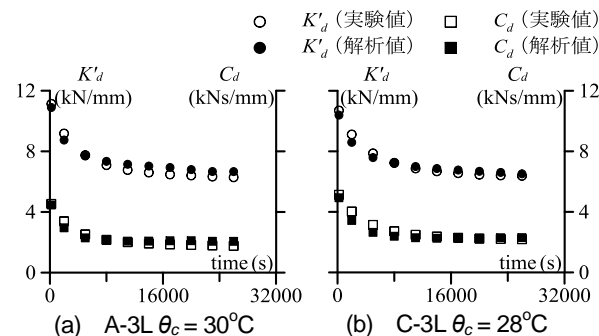


図9 置換正弦波での  $K'_d$ 、 $C_d$  の実験値と解析値の比較

以下に結論を示す。

1. 風応答波と置換正弦波の実験結果より、A-3Hでは風力の準静的成分の影響により両実験で誤差がみられたが、それ以外の実験ケースでは風応答波実験で得られた温度・貯蔵剛性・粘性係数を置換正弦波実験で概ね再現できることが分かった。
2. 地震応答波と置換正弦波での加振実験より、継続時間を地震用に変更することで、地震応答波により得られた温度上昇を置換正弦波実験で高精度に再現できることが確認できた。
3. 本研究で提案した解析モデルは、風応答波の実験結果に対しては貯蔵剛性で誤差が見られたものの、風の置換正弦波の実験結果とともに、実験で得られた温度・粘性係数を概ね再現できることが分かった。

## 【参考文献】

- 1) 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, Vol.53B, pp.67-74, 2007.3
- 2) 笠井和彦, 佐藤大樹, 黄一華: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.61-69, 2006.1
- 3) 大木洋司, 笠井和彦, 高橋治: 微小振幅における速度依存ダンパーの性能について, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.601-609, 2004.3
- 4) 秋山宏, 北村春幸: エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.37-43, 2006.10
- 5) 笠井和彦, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則 (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

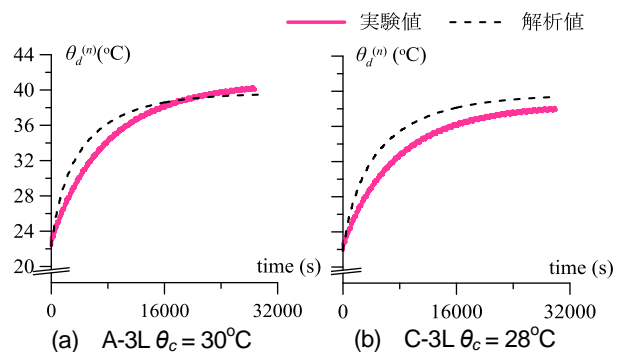


図10 風応答波での温度時刻歴の実験値と解析値の比較

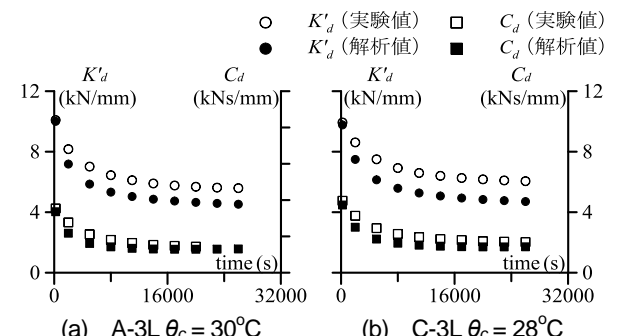


図11 風応答波での  $K'_d$ 、 $C_d$  の実験値と解析値の比較