

せん断パネルダンパーの設計式に関する一考察

その3 普通鋼せん断パネルダンパーの変形性能

玉井 宏章*, 三久保 里弥**, 妹尾 文貴***

A Design Formula of Shear Panel Damper Part 3 On Deformation Capacity of Shear Panel Damper made of SN400B Steel

by

Hiroyuki TAMAI*, Satomi MIKUBO** and Fumitaka SEO***

The authors have researched on the design requirement of shear panel damper. In this paper, to show the applicable limit of fatigue relational, we performed cyclic loading test of shear-panel-damper. As a result, the applicable usage limit for fatigue relational can be expanded up to about 0.38 normalized width-to-thickness ratio. Fatigue life becomes shorter when the shear deformation angle of the panel is higher than 0.08 rad. Then, cracks grows at the center of the panel even if the normalized width-to-thickness ratio is lower than 0.38. These results showed the validity and effectiveness of the expressions and the method.

Key words : Shear Panel, Cyclic Loading, Deformation Capacity

1 はじめに

鋼材ダンパーの性能は、建物が終局に至るまで機能を維持するものとして設計する。塑性率や累積塑性率は時刻歴応答解析で比較的求める機会が多く、地震のように繰返し回数の比較的少ない場合は累積塑性率で評価することが行われている。地震応答は、基本的に大小の振幅からなる非定常振幅の繰返し载荷であり、大きな振幅を受けると振幅比率より大きな損傷を受けるという特徴を一般によく用いられる累積塑性率では表せない。

疲労関係式はこの特徴を捉えており、個々の振幅の損傷度を強弱をつけて求めることができる。また、それらを累積和した累積損傷度を用いて限界状態に達するかどうかを判定できる¹⁾³⁾。近年、風などの繰返し回数が多い振動に限らず地震応答についても累積損傷度が性能判定指標として用いられている⁴⁾。

せん断パネルの座屈現象に基因する限界性能の評価については、等価せん断座屈変形角予測式を用いて性能を保証しうる。一方、パネル幅厚比が小さい場合やパネル変形角が小さい場合には、せん断座屈によってではなく、

パネル中央部、パネル周辺部、フランジ溶接部の亀裂が原因で耐力低下する⁵⁾。そこで、限界状態として耐力低下を限界指標に採用して、性能評価を行う。また、普通鋼パネルを用いたせん断パネルの低サイクル疲労特性を調べた実験的研究は数少ない。

これらの背景から本報では、普通鋼せん断パネルの定振幅繰返し载荷試験を行い、その疲労関係に関するデータを収集するとともに、累積疲労損傷度に関する指標を取り上げ、疲労関係式の適用限界を示す。

2 疲労関係式

まず、累積疲労損傷度を求めるための疲労関係式を示す。金属材料の疲労では、塑性ひずみ振幅と破断までの繰返し回数の関係、いわゆるマンソン・コフィンの疲労関係式が成立することが知られている¹⁾。

履歴ダンパーの疲労寿命を代表的な相対変形成分を変数にとって整理すればマンソン・コフィンの疲労関係式が良好に成り立つ²⁾。せん断パネルについても、パネル幅厚比を小さく設定し、せん断座屈が生じない場合で

平成27年1月23日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 工学部構造工学コース (Department of Structural Engineering)

*** 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

表 1 試験体の形状

	d (mm)	h (mm)	t_w (mm)	b (mm)	t_f (mm)	$\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa \cdot E}}$	$\frac{\sigma_{fu} \cdot t_f \cdot b}{\tau_{wu} \cdot t_w \cdot L}$	τ_{cr} (N/mm ²)	Q_y (kN)	Q_u (kN)
SW-A	200	200	3.1	50	5.8	0.597	2.3	142	69	95
SW-B	200	200	4.4	50	8.6	0.493	1.5	219	126	206
SW-C	200	200	5.8	75	11.6	0.379	2.6	266	197	348
SW-D	200	300	5.8	75	11.6	0.434	1.7	244	188	310

使用限界を耐力が最大耐力の 9 割に低下した時点とし、せん断変形角振幅の塑性変形成分を引数とした、次式のマンソン・コフィン則が良好に成立する。

$$N_f = \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{\gamma_a}{\gamma_f} \right|^C \quad (1)$$

ここに、 N_f ：定変位振幅下における耐力が最大耐力の 9 割に低下した時点の繰返し半サイクル数、 γ_a ：せん断変形角振幅、 C 及び γ_f は、実験定数である。 γ_f の実験定数は、 $\gamma_a = \gamma_f$ のとき(1)式では、 N_f が 1/2 半サイクルで限界に達することから、単調载荷時における限界せん断変形角という物理的意味を持っている。無補剛せん断パネルに対する実験定数 γ_f 、 C は基準化幅厚比を用いて次式で与えられる⁶⁾。

$$C = -1.72 \cdot \frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}} + 2.74$$

$$\gamma_f = -0.449 \cdot \frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}} + 0.534 \quad (2.a,b)$$

ここに、 κ_s は周辺単純支持板の板座屈係数であり、次式で与えられる。

$$\frac{d}{h} \geq 1 \quad \text{のとき、} \kappa_s = 5.34 + 4.0 \left(\frac{d}{h} \right)^2$$

$$\frac{d}{h} < 1 \quad \text{のとき、} \kappa_s = 4.0 + 5.34 \left(\frac{d}{h} \right)^2 \quad (3.a,b)$$

E ：ヤング率、 τ_u ：最大せん断耐力、

d ：パネル幅、 h ：パネル高さ、 t_w ：パネル板厚

3 極低サイクル疲労とせん断座屈の限界性能比較

前節で、広範囲の基準化幅厚比のパネルについての疲労関係式を示した。しかしながら、せん断座屈が発生する比較的薄いパネル幅厚比であれば、塑性疲労による亀裂の発生箇所は、パネル周辺とフランジ溶接部の破壊

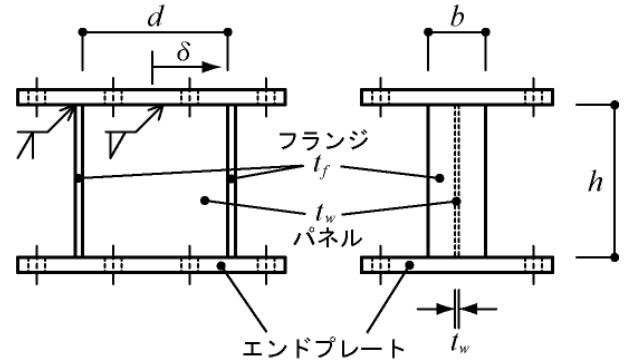


図 1 試験体概要

表 2 素材試験結果

	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	ε_{st} %	ε_u %
パネル	3.2	181	284	1.47	42
	4.5	232	390	0.65	34
	6.0	255	401	0.72	36
フランジ	6.0	255	401	0.72	36
	9.0	222	354	1.38	43
	12.0	260	397	0.72	47

からパネル中央部に移行するため、疲労関係式には適用限界があると予想できる。本節では、等価せん断座屈変形角予測式を用いて、疲労関係図中にせん断座屈する領域を表示して、実験の破壊性状と比較して、性能表示式の適用範囲を考察する。

さて、せん断座屈する振幅は次式で表される⁴⁾。

$$\gamma_a = \frac{1}{2} (\bar{\gamma}_B / \gamma_y + 1) \cdot \gamma_y \quad (4)$$

ここに、

$$\frac{\bar{\gamma}_B}{\gamma_y} = A \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_s}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_y}{\kappa_c \cdot E}} \right)^2} \quad (5.a)$$

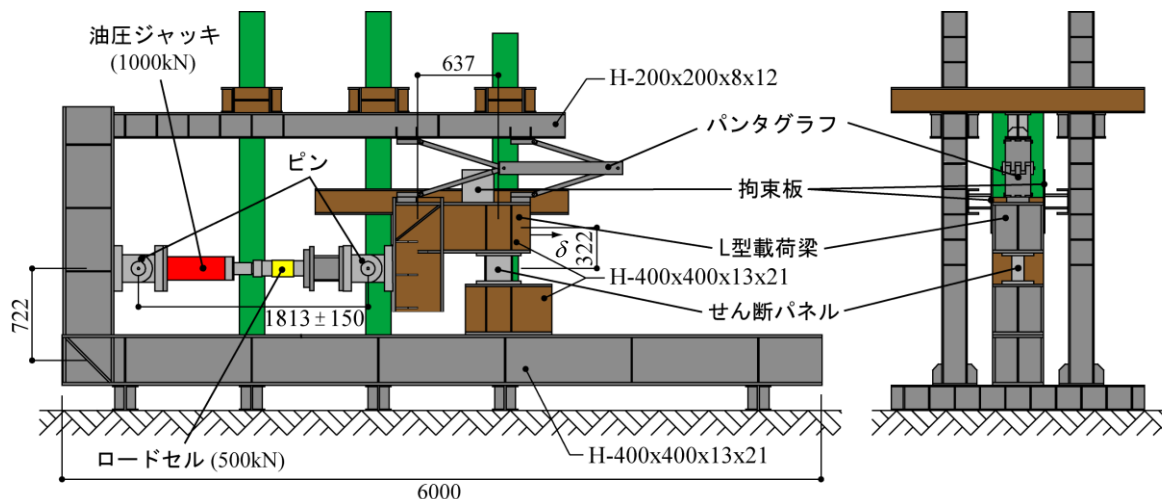


図2 載荷装置

$$(d_s/h_s) \geq 1 \text{ のとき, } \kappa_c = 8.98 + 5.60/(d_s/h_s)^2 \quad (5.b)$$

$$(d_s/h_s) < 1 \text{ のとき, } \kappa_c = 5.60 + 8.98/(d_s/h_s)^2 \quad (5.c)$$

である。γ_y は塑性せん断変形角、τ_y はせん断降伏応力で γ_y = τ_y/G であり、A は実験定数で A = 3.65 である。疲労関係図上にせん断座屈予想曲線を描く手順は以下のようなになる。

- 1) 疲労関係式に用いる基準化幅厚比を設定する。
- 2) パネル辺長比は 1.0 と設定して、等価せん断座屈変形角予測式で用いる基準化幅厚比を求め、座屈変形角 γ_a を(4)式で求める。
- 3) 疲労関係式に用いる基準化幅厚比を(3.a,b)式に代入して、実験定数 C, γ_f を求める。
- 4) 実験定数 C, γ_f と座屈変形角 γ_a をもとに、(1.a)式から疲労寿命 N_f を求め、γ_a と N_f との関係を図上にプロットする。
- 5) 2)からの手順を繰返してパネルせん断座屈判別式を描画する。

4 繰返し載荷試験の概要

○試験体

表1、図1にせん断パネルダンパーの試験体形状を示す。また、試験体に用いた鋼材の素材試験結果を表2に示す。表1にはSW-A,B,C,Dの4種の各試験体(SN400)

について、(2)式で用いる基準化幅厚比 $\frac{h}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{\tau_u}{\kappa_s \cdot E}}$ と、文献4に示したパネルせん断強さに対するフランジ軸耐力の比 $\frac{\sigma_{fu} \cdot t_f \cdot b}{\tau_{wu} \cdot t_w \cdot L}$ 、パネル最大せん断応力 τ_v、降伏せん断力 Q_y、最大せん断力 Q_u の各算定値を示している。降伏せん断力 Q_y、最大せん断力 Q_u の算定方法は文献6を参照されたい。

表3 試験結果

	δ (mm)	γ _a (rad)	Q _{max} (kN)	N _f (half cycle)	Failure Mode
SW-A-S2	2	0.01	102.3	40.5	C
SW-A-S3	3	0.015	112.7	22.5	C
SW-A-S5	5	0.025	115.9	18.5	C
SW-A-S8	8	0.04	117.8	10.5	C
SW-B-S5	5	0.025	211.5	20.5	C
SW-B-S8	8	0.04	229.2	10.5	C
SW-C-S6	6	0.03	334.6	112.5	W
SW-C-S10a	10	0.05	371.7	18.5	W
SW-C-S10b	10	0.05	376.2	29.5	W
SW-C-S16	16	0.08	402.6	15.5	C

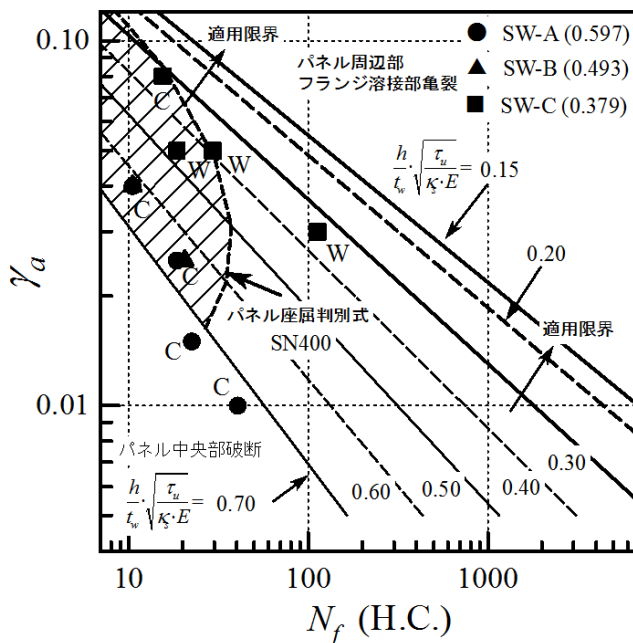


図3 変形角振幅-疲労寿命関係

○載荷装置

載荷装置を図2に示す. この載荷装置は, 全長 6000mm の反力梁 (H-400x400x13x21) 上に, L 型載荷梁 (H-400x400x13x21) と, この L 型載荷梁を水平方向に往復移動させる油圧ジャッキ及び L 型載荷梁を水平に支持する 1 組のパンタグラフ機構で構成されている. 尚, このパンタグラフ機構は, 載荷梁が水平方向に移動しても作用力は生じない. また, 載荷時にこれらの機構が水平載荷直交方向構面外にはらまれないよう拘束板を設置した.

○計測方法

荷重の計測は, 試験体に作用するせん断方向荷重 Q を, 変位の計測は, 試験体のせん断変形量としてせん断方向相対変形量 δ を計測し, 変形角 $\gamma (= \delta/h, h$ はパネル高さ) を求めた.

○載荷プログラムと試験シリーズ

載荷プログラムは定振幅繰返し載荷とし, SW-A 試験体についてはせん断変形角振幅を 2mm, 3mm, 5mm, 8mm とし, 同じく SW-B 試験体については 5mm, 8mm とし, SW-C 試験体については 6mm, 10mm, 16mm とし耐力が最大耐力の 8 割に低下するまで繰返し載荷した. 尚, SW-A, B 試験体は前年度に実施している.

5 試験結果とその考察

表 3 に, 各せん断変形角振幅 γ_a に対する最大耐力 Q_{max} と耐力が最大耐力に低下するまでの繰返し半サイクル数 N_f を示す. また, 同表中の C はパネル中央部亀裂を, W はフランジ, パネル周辺の溶接部亀裂を表す.

図 3 に, せん断変形角振幅 γ_a と繰返し半サイクル数 N_f との関係と, (1) 式の関係基準化幅厚比毎に示す. また, 正方形無補剛パネルで鋼種を SN400 と仮定して, 上述の方法でせん断座屈する限界の曲線を破線で示している. この曲線から内向きの領域が顕著なせん断座屈が生じる領域である.

写真 1 に, SW-C-S6, S10 試験体の実験後の状態をそれぞれ示す.

図 4 に, 荷重 Q とせん断変形角 γ との関係を示す.

また, 実線が初期状態の, 一点鎖線が最大耐力の 9 割低下時点の, 点線が亀裂発生後の関係をそれぞれ示している.

図 5 に, 荷重振幅 Q_a と繰返し半サイクル数 N_f との関係を示す.

表 3 及び図 3 より, SW-A, B のような基準化幅厚比が比較的大きな試験体については, 基準化幅厚比が大きくなるに従って疲労寿命は小さく, ばらつきが大きくなる傾向がある. また, 既往の研究では疲労関係式の適用限界が幅厚比 0.30 程度以下と定められており, これ以上の

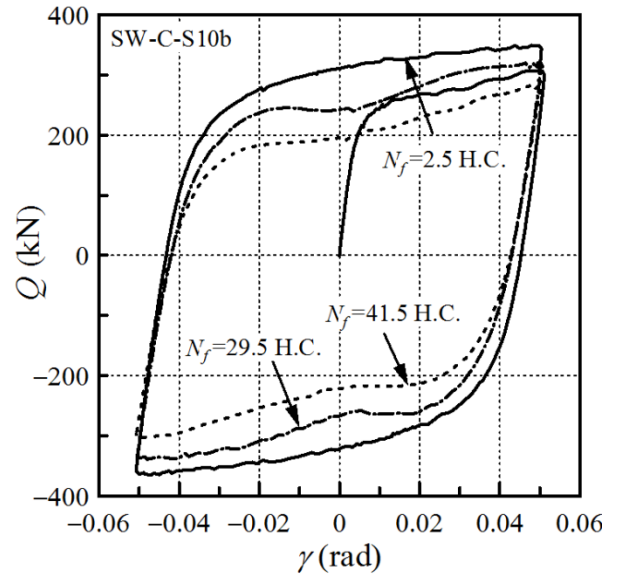


図 4 荷重-変形角関係(SW-C-S10b)試験体

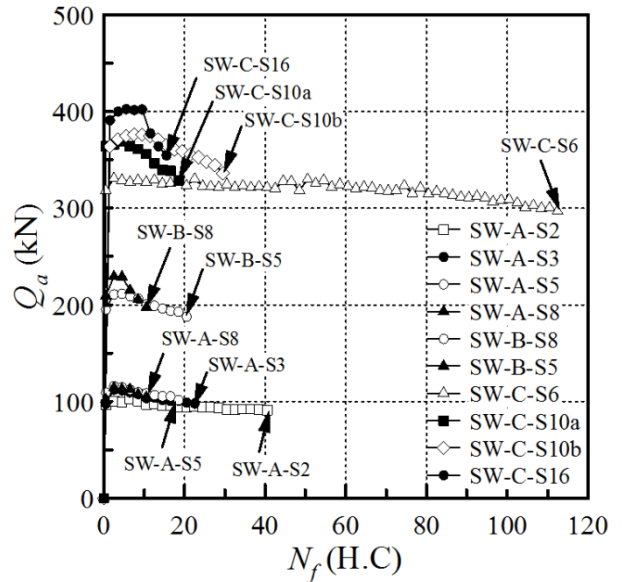


図 5 荷重振幅-繰返し半サイクル数関係

場合は, パネル中央部にて亀裂が生じる傾向にあることが確認されている. しかし, 今回新たに行った SW-C 試験体の試験結果では, 4 体中 3 体の試験体でフランジ溶接部にて亀裂が発生したため, 疲労関係式の適用限界を幅厚比 0.38 程度まで拡大しえろと考えられる. 一方, 基準化幅厚比が 0.38 程度以上の, せん断座屈を生じやすいパネルダンパーについては, 等価せん断座屈変形角予測式によって, 塑性変形性能を確保すべきと考えられる.

図 3, 4, 5 及び写真 1-(b)より, 基準化幅厚比が 0.38 程度以下の場合, せん断変形角が 0.05rad 程度以下であれば, せん断座屈による耐力低下は生じず, パネル周辺部の溶接箇所, フランジ溶接部で亀裂が発生する一方, 基準化

幅厚比が 0.38 程度以上の場合、繰返しせん断座屈によってパネル中央部で亀裂が生じる傾向が基本的に認められる。また、せん断座屈限界曲線は、この性状を表すものの、せん断変形角振幅が 0.08rad 程度と大きい場合は、疲労寿命は短くなり、基準化幅厚比が 0.38 程度以下でもパネル中央部で亀裂が生じることがあることがわかる。

6 まとめ

繰返し載荷時のせん断パネルの性能表示式として極低サイクル疲労を取り上げ、疲労関係式の整理を行った。さらに、普通鋼せん断パネルの疲労試験を行って、疲労関係式の設計データを求めるとともに、パネルせん断座屈判別式をもとに破壊性状を検討し、疲労関係式の適用範囲を検討した。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) 疲労関係式の適用限界を基準化幅厚比で 0.38 程度まで拡大しうる。
- 2) せん断変形角振幅が 0.08rad 程度と大きい場合、疲労寿命は短くなり、基準化幅厚比が 0.38 程度以下でもパネル中央部で亀裂が生じることがある。

今後の予定として、基準化幅厚比が 0.434 の試験体 SW-D(SN400)について定振幅繰返し裁荷試験を行い、今回までの結果を補充し、せん断パネル(SN400)の変形性能評価法である疲労関係式の適用限界を検討する。

謝辞

本研究は、日本建築学会鋼構造制振小委員会（主査：笠井和彦当時）の活動の一部を取りまとめたものである。小委員会の主査、幹事、委員から貴重なご意見をいただきました。また、実験経費の一部は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）（課題番号：23560687 研究代表者：玉井宏章）で賄われました。ここに記して謝意を表す。

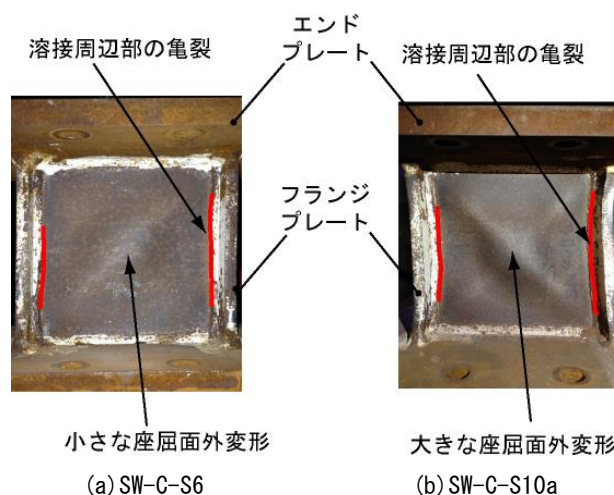


写真1 実験後の破壊性状

参考文献

- 1) 日本材料学会編：金属疲労便覧，養賢堂，pp.196-212,1978.
- 2) 玉井宏章，近藤一夫，花井正実：履歴減衰装置の極低サイクル疲労特性と実地震応答下における疲労寿命の予測，日本建築学会構造系論文集，第462号，pp.141-150,1994.8.
- 3) 古賀洋行，玉井宏章，近藤一夫，花井正実，K型ブレースの実地震応答下における疲労寿命の予測（その1）せん断抵抗材の極低サイクル疲労特性，（その2）線形累積損傷則の適用性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，pp.389-392,1995.8.
- 4) 日本建築学会，繰返し荷重効果小委員会：風と地震による繰返し荷重効果と疲労損傷，シンポジウム資料，2004.7.
- 5) 玉井宏章，せん断パネルダンパーの等価せん断座屈変形角について，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第707号，pp.137-145,2015.1.
- 6) 日本建築学会，鋼構造制振設計指針，丸善，2014.11.