

2025年度（第17回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

ねじりスリットダンパーの耐久性と制振効果に関する研究

崎山夏彦（東京理科大学） 伊藤拓海（東京理科大学） 呉東航（呉建築事務所）

1. はじめに

近年、地震時に主架構の損傷を抑制する損傷制御構造の重要性が高まっている。鋼製スリットダンパーは、安定した履歴特性を有する制振部材として利用されているが、大変形繰返し载荷時には局所ひずみ集中や疲労損傷が生じやすいという課題がある。

そこで本研究では、鋼製リブ部材に塑性ねじり加工を施した鋼製ねじりスリットダンパー（PTS-Damper）を対象とし、その耐久性および復元力特性について検討した（図1）。PTSは、リブ部に初期ねじれを導入することで、断面主軸方向を変化させ、部材全体へ応力を分散させることを目的としている。

既往研究¹⁾では、初期ねじり角度を変数とした载荷実験より、 45° 程度の初期ねじり角度で良好な履歴挙動を示し、亀裂発生が抑制されることが確認されている。また、繰返し载荷に伴い、ねじり角度が加工方向へ進行する特徴的な挙動が確認されている。

本研究では、疲労载荷実験、有限要素法解析、およびエネルギー原理に基づく解析的検討を行い、PTSのリブ部(PTSR)のねじれ進行機構と復元力特性について検討した。

2. PTSR の概要

図1にPTSRの概要を示す。試験体は板厚6mmのSS400鋼板より切り出し、中央のリブ部に冷間塑性ねじり加工を施して製作した。

本研究では、既往研究¹⁾において良好な履歴特性が確認された初期ねじり角度 45° を基本形状とした。比較対象として、ねじり加工を施していない試験体（FLAT）も製作した。

PTSRでは、载荷に伴ってねじり角度が進行し、断面特性が徐々に変化する。この特徴により、通常

のスリットダンパーと異なる復元力特性・疲労特性を示すため、後述の実験では载荷プログラムを実験変数とした。試験体一覧を表1に示す。

表1 試験体一覧

試験体名	速度	振幅[mm]	部材角[rad]
FLAT-D14	動的	14.0	1/10
FLAT-D28		28.0	1/5
FLAT-D46.7		46.7	1/3
PTSR-D14		14.0	1/10
PTSR-D28		28.0	1/5
PTSR-D46.7		46.7	1/3
PTSR-D28+		28.0 片※	1/5
PTSR-D28-		28.0 片+※	1/5
PTSR-S10	静的	10.0	1/14
PTSR-S15		15.0	1/9.3
PTSR-S50		50.0	1/2.8
PTSR-S60		60.0	1/2.3
PTSR-Sinc		漸増	
PTSR-Sdec		漸減	
PTSR-Sinc-5		漸増	

※「片」は片振幅を指している。

3. 疲労载荷実験

3.1 実験概要

PTSRの疲労性能を検討するため、低サイクル疲労载荷実験を実施した。载荷プログラムは、正負交番の一定あるいは漸増・漸減振幅の静的繰返し载荷、一定振幅動的繰返し载荷とし、試験体が破断するまで载荷を継続した。各試験体の载荷の振幅は表1に記している。水平荷重はロードセルにより計測し、水平変位およびねじり角度を測定した。

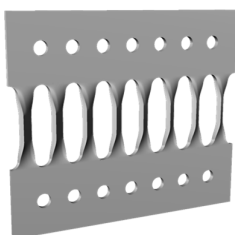


図1 PTS-Damper



図2 PTSR試験体

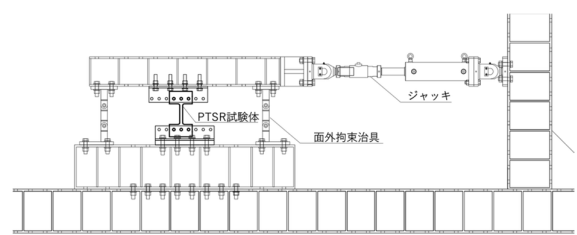


図3 セットアップ図

3.2 荷重変形関係

図 4 に荷重-変形関係の一例を示す。PTSR 試験体では、繰返し载荷に伴ってねじれ角度が加工方向へ進行し、各サイクルの荷重が徐々に低下する傾向が確認された。履歴曲線は比較的安定しており、大変形領域までエネルギー吸収性能を維持することが確認された。図 5 に示す累積水平変位とねじれ角の進展からも、振幅に応じてねじれ角の進展の様子が大きく異なることが分かる。

3.3 疲労特性

疲労曲線を図 6 に示す。一定振幅载荷実験より疲労曲線を求めた結果、PTSR 試験体は FLAT 試験体よりも大振幅領域において高い疲労性能を示した。特に、大振幅载荷時には、ねじり加工によって応力が部材全体へ分散されることで、局所的なひずみ集中が抑制されたと考えられる。一方、小振幅領域では、ねじれ進行量が小さく、FLAT 試験体との差異が小さくなる傾向が確認された。

3.4 発熱特性

赤外線サーモグラフィによる計測結果を図 7 に示す。FLAT 試験体では、き裂発生位置付近に局所的な発熱が集中したのに対し、PTSR 試験体では部材全体が高温となる傾向が確認された。塑性変形や亀裂発生に伴う発熱が局所的な発熱から相対的に分散していることから、ねじり加工により応力が広範囲へ分散されたと考えられる。

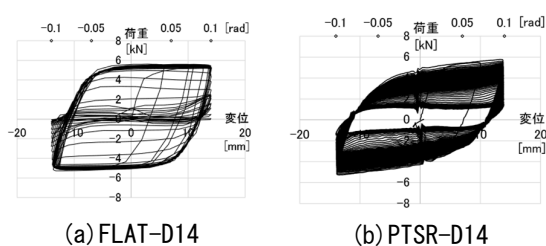


図 4 荷重変形関係の例

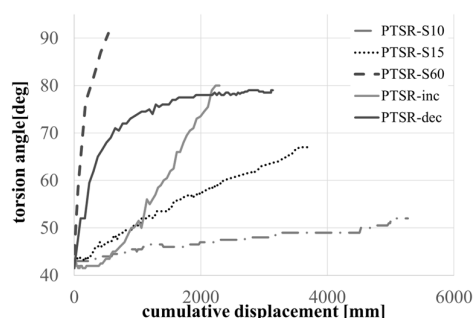


図 5 累積変形量と累積ねじり角度の関係

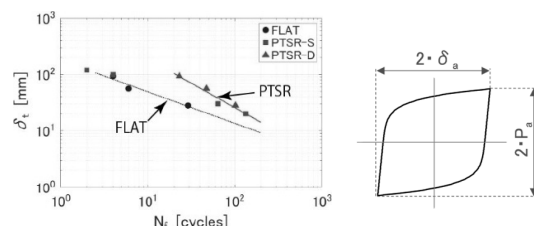


図 6 疲労曲線

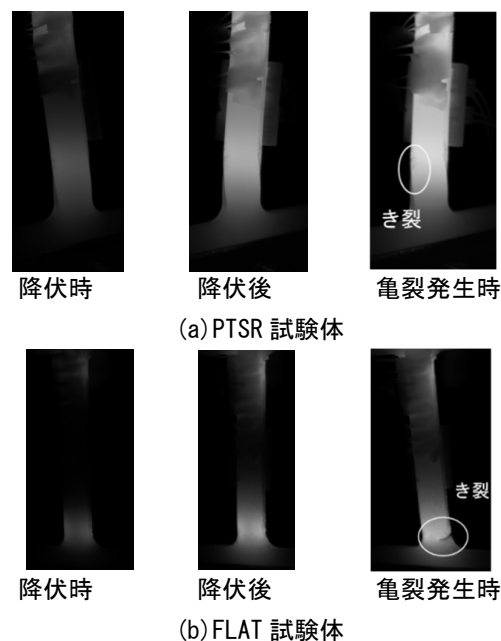


図 7 サーモグラフィによる試験体の熱画像

4. 有限要素法解析による検討

4.1 解析概要

PTSR のねじれ挙動を詳細に把握するため、MSC.MARC を用いた有限要素法解析を実施した。解析モデルは 20 節点 6 面体要素を用いて構築し、塑性ねじり加工を再現した後に水平载荷解析を行った。材料モデルには Von Mises の降伏条件および混合硬化則を用い、材料試験結果に基づく真応力-真ひずみ関係を与えた。

4.2 解析モデルの妥当性

実験結果との比較を行った結果、図 8, 9 に示す通り、荷重-変形関係およびねじれ角度履歴について、解析結果と実験結果は概ね良好に一致した。これにより、本解析モデルが PTSR の力学挙動を適切に再現できることを確認した。形状寸法の影響についても、初期ねじり角度とねじれ部長さを変数とし同様に解析し検証した。解析結果一覧を表 2 に、耐力低下の様子を図 10 に示す。ねじれ角と最大荷重の

関係から、既往研究と同様にねじれの進行に伴い包絡線に従い荷重が低下している様子が確認できる。

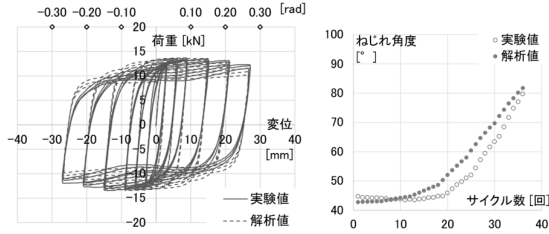


図 8 荷重変形関係の解析結果

図 9 ねじれ角度の解析結果

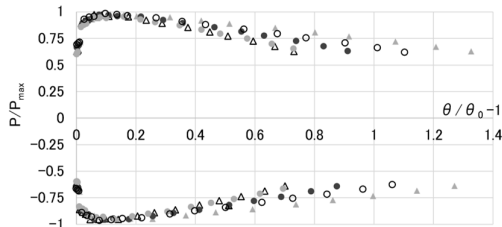


図 10 ねじれ角度進行と耐力低下の関係

表 2 各種解析結果

試験体 ID	単位初期ねじり 角度[°/mm]	降伏荷重 [kN]	初期剛性 [kN/mm]	最大荷重 [kN]
45-30 (base)	1.50	4.77	4.8	6.85
45-40	1.13	5.22	5.5	7.33
45-20	2.25	4.12	3.8	6.01
58-40	1.50	4.85	4.9	7.00
32-20	1.50	4.72	5	6.83

※試験体 ID は(初期ねじり角度)・(ねじれ部長さ)とする。

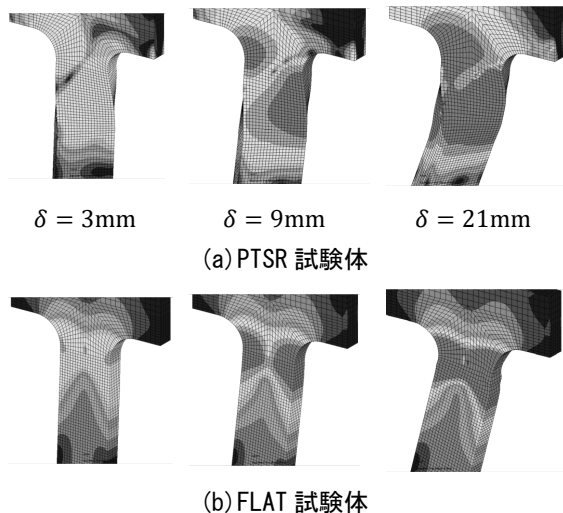


図 11 相当ミーゼス応力の FEM 解析結果

4.3 応力分布とねじれ進行

図 11 に相当ミーゼス応力分布の推移を示す。ねじり加工を施した試験体では、応力が局所集中せず、広範囲へ分散される傾向が確認された。また、主応力ベクトルの推移を分析した結果、水平荷重による曲げ応力と、ねじれ変形に起因するせん断応力が連成することで、断面内の圧縮領域が偏在化し、これがねじれ進行の要因となることが示唆された。

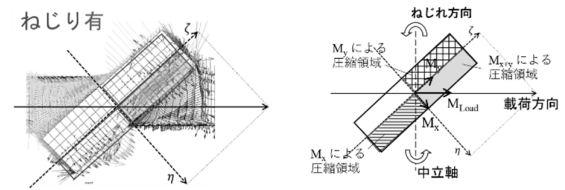


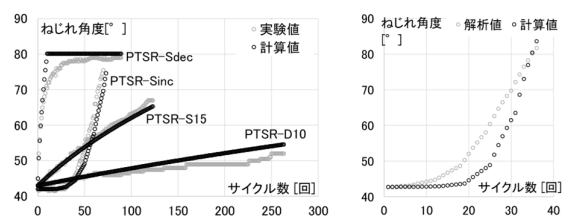
図 13 ねじれ進行の要因

5. ねじれ進行式の提案

実験結果に基づき、PTSR 試験体における半サイクルあたりのねじれ角度増分を表す算定式を推定した。算定式では、最大経験振幅、現在振幅、単位初期ねじり角度を考慮しており、実験結果および有限要素法解析結果の履歴曲線を概ね追跡できることを確認した。また、単位初期ねじり角度が小さいほど、ねじれ進行が生じやすい傾向が確認された。

$$\Delta\theta = A \cdot (R_{max})^m \cdot R \cdot e^{-\Phi} \cdot \left[\frac{\max(0, R - C \cdot R_{max})}{R_{max} \cdot (1 - C)} \right]^n$$

ここで、 $\Delta\theta$: 半サイクルあたりのねじれ進歩量 [deg], R : 現在の部材角 [rad], R_{max} : その時点までの最大経験部材角 [rad], Φ : 単位長さあたりのねじれ角度 [deg/mm] である。また、 A : ねじれ進行係数 [deg/rad], m : 载荷履歴指数, C : ねじれ限界比率, n : 減衰形状指数は実験により決まる係数である。最小二乗法により A, m, C, n を定めたところ、 $A=5.11 \times 10^3, m=2.89, C=0.68, n=79.1$ の値を得た。



(a) 実験との比較

(b) 解析との比較

図 14 ねじれ角度の提案式との比較

6. 横ねじれ座屈に基づく解析的検討

PTSR のねじれ進行は、鋼製スリットダンパーにおける横ねじれ座屈²⁾と類似した不安定現象である可能性がある。そこで、本研究では、全ポテンシャルエネルギーの原理に基づき、PTSR の横ねじれ座屈問題を定式化し、座屈耐力について検討した。全ポテンシャルエネルギーを、

$$\Pi[w, \phi] = U_b + U_t + U_{cpl} \quad (2)$$

とし、面外曲げひずみエネルギー、ねじりひずみエネルギー、曲げ-ねじり連成項を考慮した。変分原理より、横ねじれ座屈の支配方程式を導出すると、

$$-(G(x)J(x)\phi'(x))' - \frac{M^2(x)}{E(x)I(x)}\phi(x) = 0 \quad (3)$$

が得られた。ただし、 E :ヤング係数、 I :断面二次モーメント、 w :面外たわみ、 G :せん断係数、 J :ねじり定数、 ϕ :ねじり角度、 M :曲げモーメントとする。さらに、上記の支配方程式に関して固有値問題を解き、PTSR の横ねじれ座屈耐力について検討した。

$$V_{cr} = \frac{M_{cr}}{l} = \lambda \frac{\sqrt{E_0 I_0 G_0 J_0}}{l^2} \quad (4)$$

さらに、本解析では、部材剛性を一定の弾性定数とせず、塑性化に伴う剛性低下を考慮した。塑性域の応力-ひずみ関係は Johnson-Cook 型の簡略構成式を用い接線係数が $d\sigma/d\varepsilon_p = nB\varepsilon_p^{n-1}$ に従うものとし、曲げとせん断に対する接線係数 $E_t(x)$ 、 $G_t(x)$ を求めた。さらに、接線係数をそのまま用いると反復計算が不安定となるため、Tangent Modulus 理論に基づき平滑化した等価係数 $E_r(x)$ 、 $G_r(x)$ を式(5)のように仮定し、式(6)の式に従い逐次更新させた。

$$E_r(x) = \frac{4E E_t(x)}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_t(x)})^2}, G_r(x) = \frac{4G G_t(x)}{(\sqrt{G} + \sqrt{G_t(x)})^2} \quad (5)$$

$$E_{eff}^{(k+1)}(x) = (1 - \alpha_{MCR})E_{eff}^{(k)}(x) + \alpha_{MCR}E_r(x) \quad (6)$$

更新後の $E_{eff}(x)$ と $G_{eff}(x)$ は式(4)に逐次代入し、収束まで反復させ、座屈耐力を評価した。

先行研究¹⁾の FEM 解析結果との比較を図 15 に示す。初期ねじり角の増加に伴ってリブの面外剛性が増大し、PTSR の横ねじれ座屈耐力が塑性座屈領域へ移行することが確認できる。一方、初期ねじり角が過大になると、載荷方向に関する断面性能が低下し、載荷方向の耐力が減少する。これに伴い、載荷方向に関連する面外荷重も低下するため、横ねじれ座屈耐力は降伏耐力と同様の低下傾向を示す。

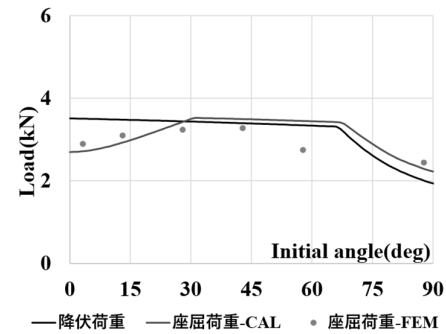


図 15 解析結果の比較

7. まとめ

本研究では、ねじりスリットダンパーのねじり部を対象として、耐久性および復元力特性について検討した。低サイクル疲労実験の結果、初期ねじり無しの試験体よりも高い疲労性能を示し、局所的なき裂発生が抑制されることを確認した。また、有限要素法解析および熱画像より、ねじり加工によって応力が広範囲に分散されること、および曲げ-ねじり連成によりねじれ進行が生じることを確認した。得られた変形とねじりの関係を定式化したうえで、さらに、全ポテンシャルエネルギーの原理に基づく解析的検討を行い、PTSR のねじれ進行が横ねじれ座屈に類似した不安定現象として整理できることを示した。

今後は、提案したねじれ進行式を用いた復元力モデルの構築および時刻歴応答解析などにより、実構造物への適用に向けた解析的検討を進める予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、元東京理科大学大学院生の廣松春南さん、東京理科大学大学院生の藤田達君、豊田幹太君、宮里優吾君にご協力いただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 藤田達, 伊藤拓海, 崎山夏彦, 廣松春南, 吳東航: ねじり加工した鋼製リブのせん断部材の力学挙動と復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.91, No.843, pp.672-683, 2026.05
- 2) Ma X., Borchers E., Pena A., Krawinkler H., Billington S. and Deierlein G.G.: Design and Behavior of Steel Shear Plates with Opening as Energy-Dissipating Fuses, John A. Blume Earthquake Engineering center Technical Report, No.173, Stanford University, 2010.3