

レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発
その4 設計モデルと劣化損傷度評価

制震 低降伏点鋼 レンズ型ダンパー
ひずみ硬化 トリリニアモデル 劣化損傷度評価

正会員 ○三塩 洋一* 正会員 尻無濱昭三*
同 久保田雅春** 同 阿部 隆英**
同 石山 昌幸*** 同 山崎 信宏***

1. はじめに

筆者らは、低降伏点鋼を用いたレンズ型せん断パネルダンパー（以下、LSPD）を提案し、これまでにその性能確認実験を行っている^{1),2)}。

LSPD は、レンズ型せん断パネルをせん断変形に伴う鋼材の塑性化による履歴エネルギー吸収を期待する制震装置であり、その適用にあたっては、力学的特性を把握した上で設計モデル化を行うと同時に、使用限界状態を定量的に把握、評価する必要がある。

本報では、実験結果に基づき構築した LSPD の設計モデルと劣化損傷度の評価手法を報告する。

2. LSPD の設計モデル

2.1 概要

LSPD の設計モデルは、低降伏点鋼の材料特性を考慮して、図 1 に示すひずみ硬化型トリリニアモデルの非線形ばねとした。一次剛性 k_1 、設計降伏荷重 F_y および設計最大荷重 F_{max} を式(1)～式(3)に示す。なお、降伏決定関数 η は、実験結果から一次剛性の 1/20 とし、一次剛性に比例する関数とした。

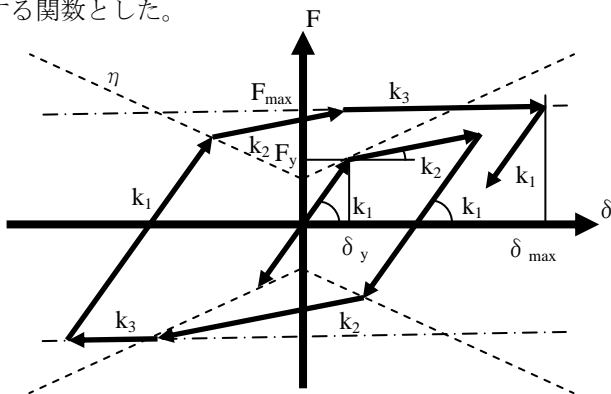


図 1 設計モデル（ひずみ硬化型トリリニアモデル）

k_1	一次剛性(kN/mm)	k_2	二次剛性(kN/mm)
F_y	設計降伏荷重(kN)	F_{max}	設計最大荷重(kN)
σ_y	材料の降伏耐力(N/mm ²)	σ_t	材料の引張強さ(N/mm ²)
S_{30}	最小有効せん断断面面積 (mm ²)	S_{max}	最大有効せん断断面面積 (N/mm ²)
T	板厚(mm)		

$$k_1 = \frac{171}{12} T \quad (1) \quad F_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} S_{min} \quad (2) \quad F_{max} = \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}} S_{30} \quad (3)$$

式(1)に示す一次剛性は、せん断弾性係数、レンズ型せん断パネルの断面積および有効高さを考慮し、実験に基づき定数を決定した。その 3 の報告から、レンズ型せん断パネルの力学的特性は相似則に基づくことから、板厚 T の関数として評価することができる。

写真 1 に最小有効せん断断面 S_{min} および最大有効せん断断面 S_{30} を示す。レンズ型せん断パネルの主応力方向は、FEM 解析³⁾結果から、変形とともに最小断面である 0 度方向から最大断面である 30 度方向の範囲にあることを確認している。よって、式(2)に示す設計降伏荷重 F_y は、最小有効せん断断面 S_{min} と材料の降伏耐力 σ_y を用いて算出でき、式(3)に示す設計最大荷重 F_{max} は、最大有効せん断断面 S_{30} と材料の引張強さ σ_t を用いて算出できる。なお、設計降伏荷重 F_y と設計最大荷重 F_{max} の算出に用いる材料の降伏耐力 σ_y と引張強さ σ_t は、材料の許容範囲を考慮し、下限値を用いる。

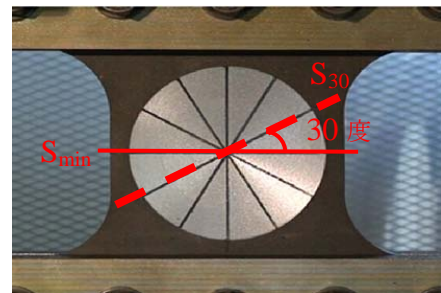


写真 1 有効せん断断面

2.2 実験と設計モデルの比較

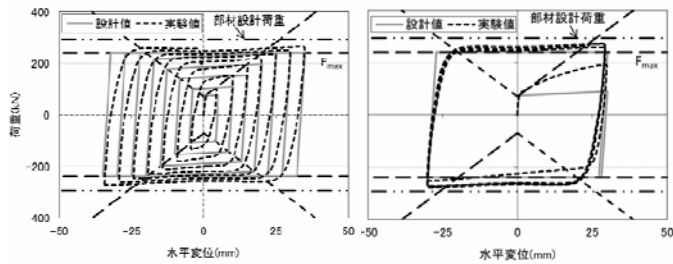
図 2 に材種を LY100、形状タイプを type12-6 とした、変位漸増繰返し加力実験と変位一定繰返し加力実験における実験結果¹⁾と設計モデルの比較を示す。なお、図 2 に示す部材設計荷重とは、LSPD を取付ける周辺部材等を設計する際の荷重を示す。各設計荷重の算定時に用いる材料の降伏耐力 σ_y と引張強さ σ_t は、設計最大荷重 F_{max} の算定時に下限値とし、部材設計荷重の算定時に上限値とする。

変位漸増繰返し実験では、ひずみ硬化の影響により水平変位の増加と共に荷重は上昇し、その後、収束する傾向が見られた。設計最大荷重 240.0kN に対する実験時の最大荷重 271.8kN の比率は、約 1.13 倍であった。なお、

図 2(a)で示されるように、設計上三次勾配を迎えた時の実験の履歴曲線は、設計最大荷重と部材設計荷重の間を推移している。

変位一定繰返し実験において、設計最大荷重 240.0kN に対する実験時の最大荷重 277.5kN の比率は、約 1.16 倍であった。なお、図 2(b)から示されるように設計上三次勾配を迎えた時の 2 サイクル目以降の実験の履歴曲線は、設計最大荷重と部材設計荷重の間を推移している。

これらより、ひずみ硬化型トリリニアモデルは、LSPD の設計モデルとして、妥当と考える。



(a)変位漸増繰返し加力実験結果 (b) 変位一定繰返し加力実験結果
図 2 実験結果と設計モデルの比較

3. LSPD の劣化損傷度評価

レンズ型せん断パネルは、地震時において繰返し加力を受けると材料の塑性化により劣化損傷を受け、き裂を生じる。

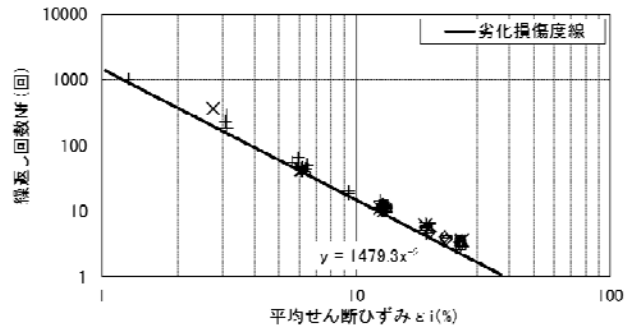
レンズ型せん断パネルに生じる劣化損傷度は、変形の大さと累積変形性能に依存するため、劣化損傷度評価は、マイナー則により行う。具体的には、各変形に対して劣化損傷度を求め、それらの和が、一定値以下であることを確認する。なお、変形頻度分布の算出は、鋼構造物の疲労設計指針・同解説⁴⁾に記載のピーク法を使用した。

表 1 に示すこれまでの実験結果から算出した劣化損傷度線を図 3 に示す。図 3(a)の縦軸は繰返し回数、図 3(b)の縦軸は限界累積平均ひずみであり、両図とも横軸は平均せん断ひずみ ϵ_i ¹⁾である。ここで、劣化損傷度線は、各実験により得た累積変形性能 y_i の下限値となるよう決定した関数であり、式(4)で示される。また、劣化損傷度 D を式(5)に示す。レンズ型せん断パネルに、き裂の発生する繰返し回数 N_f は、レンズ型せん断パネルの弾性変形と塑性変形を合わせた繰返しの挙動によって蓄積される劣化損傷度 D との関係にあることから、式(5)より算出される劣化損傷度 D の総和が 1 以下となるように設計を行う。

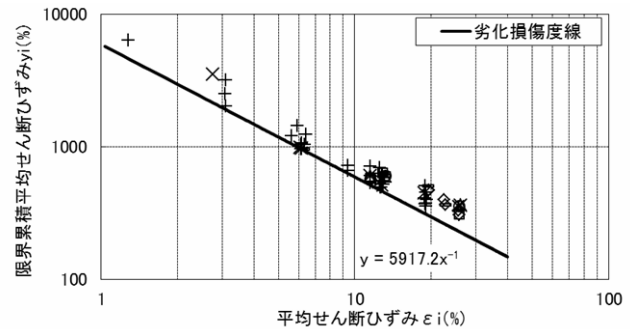
$$\epsilon_i \times y_i = 5917 \quad (4) \quad D = \sum \left(\frac{1}{N_f} \right) = \sum \left(\frac{4\epsilon_i^2}{5917} \right) < 1 \quad (5)$$

表 1 実験条件の一覧とき裂発生回数^{1),2)}

鋼材	種別 (type)	平均せん断ひずみ (%)				
		3.2	6.4	12.8	19.2	25.6
LY100	12-6	285	44	11	7	4
	18-9	-	-	12	-	4
	24-12	-	-	12	-	4
LY225	12-6	363	42	12	7	4
	18-9	-	-	11	-	4
	21-10.5	-	-	13	-	4



(a) 繰返し回数と平均せん断ひずみ



(b) 限界累積平均せん断ひずみと平均せん断ひずみ

図 3 劣化損傷度線

4. まとめ

本検討により得た結果を以下に示す。

- LSPD の設計モデルとして、ひずみ硬化型トリリニアモデルを提案した。また、設計モデルと実験結果とを比較し、その妥当性を確認した。
- 実験結果に基づき、劣化損傷度線を構築し、劣化損傷度の設計式を提案した。

【参考文献】

- 1) 山崎信宏, 久保田雅春, 三塩洋一, 他: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.8 (投稿中)
- 2) 石山昌幸, 久保田雅春, 三塩洋一, 他: レンズ形状を有するせん断パネルダンパーの開発, その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.8 (投稿中)
- 3) midas Gen (Ver. 7.6.1) (株)構造計画研究所
- 4) (社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.4

* 鉄建建設株式会社 建築本部
** 飛島建設株式会社 建設事業本部
*** 日本 Casting 株式会社 エンジニアリング事業部

* Architectural Division, TEKKEN CORPORATION
** Construction Division, TOBISHIMA CORPORATION
*** Engineering Division, NIPPON CHUZO