

高機能無補剛せん断パネルダンパーの復元力モデルの構築に関する研究

名城大学大学院 学生会員 大場 孝太
名城大学 正会員 葛 漢彬

1. まえがき

構造物の耐震性能を向上させる方法として、現在のところ大きく分けて耐震構造、制震・免震構造の2種類が確立されている。制震構造は、主構造の損傷を極力小さくしほぼ弾性域内に収め、地震後に交換・補修が容易な2次部材にエネルギー吸収を集中させ、耐震性能を向上させる構造である。エネルギー吸収部材は以上のような特徴から犠牲部材とも呼ばれる。本研究ではこの犠牲部材の1つでせん断降伏型の履歴ダンパーであるせん断パネルダンパー(Shear Panel Damper, 以下 SPD と称す)を無補剛の場合に限定して取り扱う。また、高機能 SPD 開発^{1,2)}に着目し、幅厚比パラメータ (R_w) が 0.14, 0.20, 0.25 の厚肉な鋼板からなる SPD について、修正 2 曲面モデル³⁾を用いた解析データを、実験データ²⁾との比較を行い、その結果を利用し、混合硬化則という概念を適用することによって、SPD の復元力特性をうまく模擬することができる新たな復元力モデルの構築を行う。

2. 解析概要

表-1 SPD の構造パラメータ

2.1 解析モデル

解析モデルは表-1、表-2 および図-1 に示すように SPD の弾塑性繰り返し挙動を調べるためにシェルモデルで解析を行った。また、モデルは幅厚比パラメータを変えた3種類であった。

供試体名	ウェブ						フランジ	
	a (mm)	b_w (mm)	t_w (mm)	α	b_w/t_w	R_w	b_f (mm)	t_f (mm)
①SPD-0.14	250	250	16.00	1.0	15.63	0.14	150	14
②SPD-0.20	250	250	11.00	1.0	22.73	0.20	150	14
③SPD-0.25	250	250	8.84	1.0	28.57	0.25	150	14

表-2 材料パラメータ

鋼材	E (GPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y	ν	σ_u (MPa)
SS400	205.8	235.2	0.00114	0.3	425
SM490Y	205.8	313.6	0.00152	0.3	504.9
LY225	212.0	237.0	0.00112	0.3	328

2.2 解析条件

SPD-0.14 についてはウェブ部分が低降伏点鋼 LY225、フランジ部分が普通の構造用鋼材 SM490Y、他のモデルはフランジ、ウェブともに SS400 を用いた。また、低降伏点鋼 LY225 については SS400 に近い材質であるため SS400 のパラメータを代用することにより算定した。境界条件は $x=0$ を完全固定とし、フランジについては x 方向を除き固定とした。分割数はウェブが x 方向、 y 方向をウェブと同様に 18 分割、 z 方向を 12 分割した。残留応力は、短形分布を用い、引張残留応力が生じる部分に降伏応力 σ_y を、それ

以外の要素に圧縮残留応力 σ_{rc} を与えた。なお、 σ_{rc} は $0.3\sigma_y$ である。(図-2 参照)残留応力の幅はつりあいを保つように $b_c:b_t=1:0.3$ とし、メッシュ分割は引張残留応力部に各 3 要素、圧縮残留応力部に 15 要素とした。

2.3 構成則

構成則は、名古屋大学で開発された修正 2 曲面モデル³⁾を用いる。修正 2 曲面モデルは繰り返し荷重を受ける鋼材(SS400, SM490, SM590)に対して実験結果に非常に近い挙動を予測できる構成則である。

2.4 荷重方法

図-3 に荷重方法を示し、以下にその概要を示す。荷重パターンは漸増荷重を主体とする。まず、平均せん断ひずみを $\pm 5\%$, $\pm 7\%$, $\pm 9\%$ と漸増荷重を行い、そしてその後 $\pm 12\%$ で定振幅繰り返し荷重を行う。なお、定振幅荷重の回数は累積塑性ひずみ 280%を満たす回数とする。定振幅荷重は CID が 280%に達した時点で終了する。ここで、

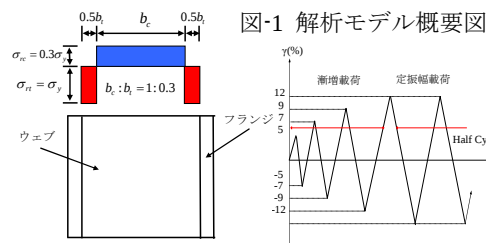
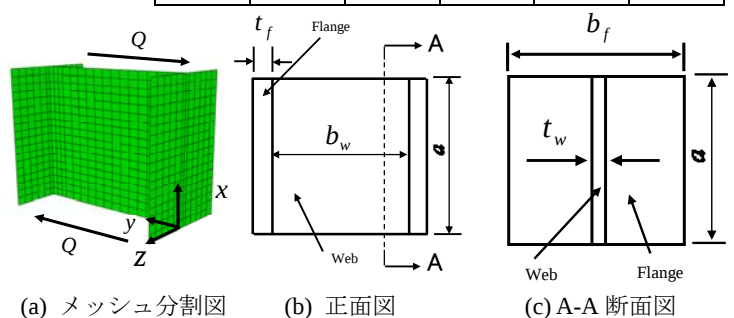


図-2 ウェブの残留応力分布

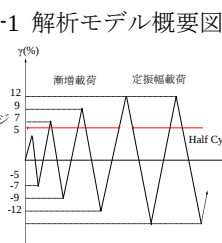


図-3 荷重パターン

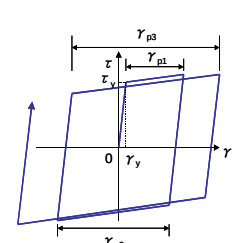


図-4 CID の定義

CID は式(1)で定義される(図-4 参照).

$$CID = \sum \gamma_{pi} \quad (1)$$

3. 解析結果および混合硬化則の適用

3.1 解析結果および混合硬化パラメータの提案

混合硬化則は塑性域での挙動を弾性域の変化, 背応力の変化を基に表現し, また弾性域や背応力の変化を考慮した構成則¹⁾である. 混合硬化則では, 弾性域の大きさ τ_y^t は以下の式(2)で与えられる. ここで, τ_y は初期のせん断降伏応力, $\bar{\gamma}_p$ は累積塑性せん断ひずみであり, 塑性せん断ひずみを γ_p とすると式(3)で表される. また, 背応力 α は以下の式(4)で表される. ここで α_1 は各サイクルの初期の背応力である. 以上より, 混合硬化則では降伏後のせん断応力は式(5)で表される.

$$\tau_y^t = \tau_y + C_1 \{1 - \exp(-C_2 \bar{\gamma}_p)\} \quad (2)$$

$$\bar{\gamma}_p = \int |d\gamma_p| \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{D_1}{D_2} \{1 - \exp(-D_2 \gamma_p)\} + \alpha_1 \exp(-D_2 \gamma_p) \quad (4)$$

$$\tau = \tau_y + C_1 \{1 - \exp(-C_2 \bar{\gamma}_p)\} + \frac{D_1}{D_2} \{1 - \exp(-D_2 \gamma_p)\} + \alpha_1 \exp(-D_2 \gamma_p) \quad (5)$$

定常サイクルでは, 背応力は式(6)で表される.

$$\alpha_i = \tau_i - \tau_{ec} \quad (6)$$

ここで τ_{ec} は弾性域の大きさの収束値であり, せん断降伏応力 τ_y と最大せん断応力 τ_u を用いて式(7)で表される.

$$\tau_{ec} = \frac{\tau_y + \tau_u}{2} \quad (7)$$

ここで, せん断変形 12% の 1 回目の履歴ループを定常サイクルと仮定して式(4)から得られる背応力が式(6)から得られた背応力の値に近似的に近づくように移動硬化パラメータ D_1 , D_2 , 各サイクルの弾性域の大きさ τ_y^t とそのときの累積塑性せん断ひずみ $\bar{\gamma}_p$ を抽出し, 式(7)と比較することにより C_1 , C_2 の値をそれぞれ求める. これらの理論を基にして各モデルにおける混合硬化則パラメータの推奨値(表-3)を算出し, 3 つのモデルのパラメータの平均値を用いて高機能無補剛 SPD の混合硬化則パラメータの推奨値(表-4)を提案した.

3.2 考察

表-5 から, 実験結果がある SPD-0.14 の場合についていえば修正 2 曲面モデルよりも混合硬化則のほうが実験結果に近いエネルギー吸収量を示していることがわかる. また, 図-6 からわかるようにウェブの幅厚比パラメータ R_w を 0.14~0.25 の間で変化させたときに R_w の値が増加するほどウェブのせん断座屈が大きくなっており, 同時にエネルギー吸収量が減少していることがわかる. さらに, 履歴曲線を見てもわかるように, 提案した混合硬化則は実験と解析の結果を精度よく模擬できている.

4. あとがき

実験結果と解析結果を基にして, 精度の良いエネルギー吸収量を得られるような復元力モデルを作成するためのパラメータの推奨値を算出し, 混合硬化則を適用した復元力モデルを提案した. また, 実験データとの比較により混合硬化則を用いた復元力モデルの妥当性を検証した.

参考文献: 1) 葛ら(2010): 高機能補剛せん断パネルダンパーの繰り返し弾塑性挙動と復元力モデルに関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.56A, pp.522-532. 2) 小池ら(2008): 高機能せん断パネルダンパーの開発に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.54A, pp.372-381. 3) Shen ら(1995): Cyclic Behavior of Structural Steels. II: Theory. J. Engrg. Mech., ASCE, 121(11), pp.1165-1172.

表-3 各モデルにおける混合硬化則パラメータの推奨値

モデル名	等方硬化パラメータ		移動硬化パラメータ	
	C_1	C_2	D_1	D_2
SPD-0.14	65.23	15.12	9.13×10^2	12.27
SPD-0.20	63.21	19.36	9.16×10^2	14.75
SPD-0.25	58.33	25.94	1.03×10^3	23.81

表-4 高機能無補剛 SPD の混合硬化則パラメータの推奨値

等方硬化パラメータ		移動硬化パラメータ	
C_{1Ave}	C_{2Ave}	D_{1Ave}	D_{2Ave}
62.26	20.14	9.54×10^2	16.94

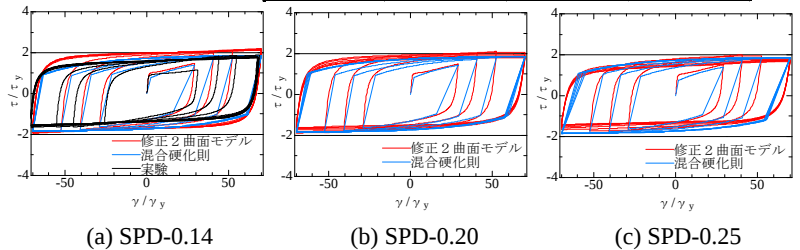


図-5 履歴曲線の比較

表-5 エネルギー吸収量の比較

モデル名	無次元化エネルギー吸収量 ($\gamma=12\%$ の 6CYCLE 終了時)		
	修正 2 曲面モデル	混合硬化則	実験
SPD-0.14	3250	2880	2690
SPD-0.20	3030	2870	
SPD-0.25	2680	2810	

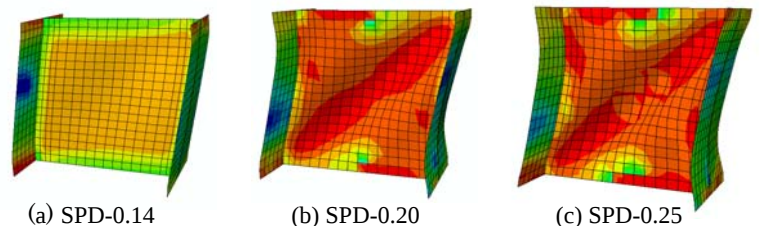


図-6 9サイクル終了時におけるSPDの変形図

(a) SPD-0.14

(b) SPD-0.20

(c) SPD-0.25