

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

A study on cyclic behavior and hysteretic model of high-performance stiffened shear panel dampers

葛 漢彬*, 金子恵介**, 宇佐美 勉***
Hanbin Ge, Keisuke Kaneko and Tsutomu USAMI

*正会員, 博士(工学), 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒464-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

**正会員, 修士(工学), 東日本旅客鉄道株式会社 新宿保線技術センター (〒164-0001 東京都中野区中野 2丁目 10-17)

***フェロー, D.Sc., 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒464-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

This study aims at developing a kind of high performance shear panel dampers (SPDs) with maximum shear deformation of 12% and cumulative inelastic deformation of 280%. In this study, stiffened SPDs are analyzed using ABAQUS program together with the modified two surface model developed at Nagoya University for structural steels. The validity of the analytical model is verified by comparing with previous experimental results. Based on both experimental and analytical results, a hysteretic model with good accuracy is newly developed for such high performance SPDs.

Key Words: Stiffened shear panel damper, cyclic behavior, hysteretic model

キーワード: 補剛せん断パネルダンパー, 繰り返し弾塑性挙動, 復元力モデル

1. 緒言

著者らは、鋼橋のライフサイクルにわたって取り替え不要な高機能せん断パネルダンパー (SPD) の開発を目的として補剛した SPD の正負交番繰り返し載荷実験を行った¹⁾。それによると、せん断幅厚比パラメータ、補剛材剛比などを適切に設計すれば目標の最大せん断ひずみ ($\gamma_u=12\%$) と累積塑性変形 ($CID=280\%$)²⁾を確保することができる。しかし、構造物へ適用する際、耐震解析に必要な復元力モデルの構築にまで至っていない。

本研究では、実験結果を踏まえ、解析的検討により、この種の高機能制震ダンパーの復元力モデルの構築を主な目的としている。SPDの復元力モデルに関しては、Chenら³⁾が行った一連の数値解析的検討により、バイニア型の復元力モデルが提案されているが、前述の要求性能(最大せん断ひずみと累積塑性変形)を満たさないことよりその適用範囲は限定されている。また、同報ではSPDのウェブに普通鋼SS400を用いたが、地震時において確実に主構造より先行して降伏させるためには、降伏応力に対し厳しい狭幅管理がなされて

いる低降伏点鋼(LY100, LY225)の適用が望ましく、それらを用いた際の復元力特性が今後必要であると予想される。

以上のことから、本研究ではウェブに低降伏点鋼であるLY225を適用し、実験結果¹⁾と比較することにより、解析モデルの妥当性を検証し、所定の要求性能を満たす高機能補剛SPDの復元力モデルを提案する。

2. 高機能ダンパーの概念とSPDの主要構造パラメータの定義

本研究でいう高機能制震ダンパーとは、構造物の供用期間中に複数回の地震や本震後複数回の大きな余震があっても取り替えが不要な制震ダンパーのことである。したがって、変形能力が大きく、安定した履歴特性を有し高いエネルギー吸収能を持つ必要がある。また、低サイクル疲労強度や耐久性の面においてもある所定の要求性能を満たす必要がある。

前報¹⁾でも述べられたように、高機能補剛SPDに要求される変形性能および低サイクル疲労の限界値として、最大せん断ひずみ γ_u および累積塑性変形の制限

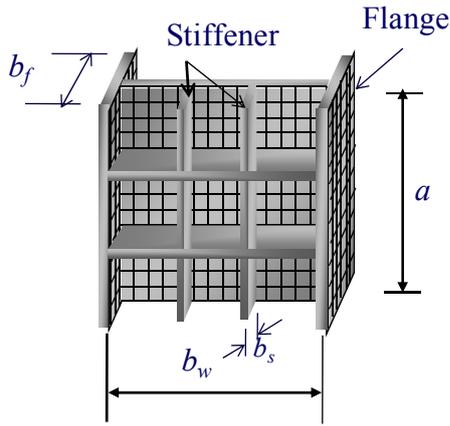


図-1 SPD 概要図

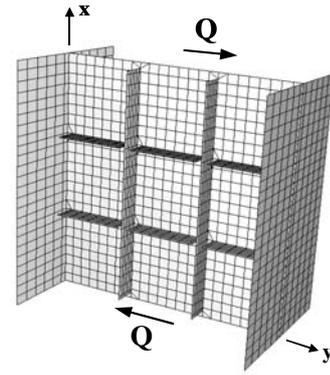


図-2 解析モデル

値 $(CID)_{lim}$ がそれぞれ $\gamma_u=12\%$, $(CID)_{lim}=280\%$ と設定されている。SPD の最大せん断ひずみおよび累積塑性変形に対する要求性能は、まだ研究途中⁴⁾にあるが、文献 5)より座屈拘束ブレース (以下、BRB という) での性能 ($\epsilon_u=3\%$, $(CID)_{lim}=70\%$) を基に、幾何学的な考察から設定されたものである。

図-1 に SPD の概要図を示す。SPD が高いエネルギー吸収能を有するためには、安定した履歴ループを描く必要がある。そのためには、座屈に伴う耐力低下を避けなければならない。ウェブのせん断座屈パラメータと補剛材の剛比が重要なパラメータである。また、前述した変形に関する要求性能である最大せん断ひずみ 12% は当然ウェブ高さに依存し、ウェブ高さを大きくする場合、後述する式(1)で示されるようにせん断座屈パラメータを一定に保つためには、ウェブの板厚を大きくするか、補剛材の本数を多くしなければならない。しかし、ウェブの板厚を大きくすると降伏耐力も同時に大きくなってしまいうので、地震時に主構造よりも先に降伏して履歴減衰を付与する SPD に対しては望ましくない。したがって、エネルギー吸収を積極的に行うためには、補剛材の本数を増やす方法が有効であり、補剛材がウェブにおいて十分な補剛効果を発揮するには補剛材の剛比が重要な設計パラメータとして挙げられる。

せん断座屈パラメータは以下の式で定義される。

$$R_w = \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\tau_y}{k_s \pi^2 E}} \quad (1)$$

ここで、 b_w と t_w はそれぞれウェブ幅、ウェブ厚さであり、 τ_y はせん断降伏応力 ($\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$) である。また、 E はヤング係数、 ν はポアソン比、 k_s は座屈係数である。ここで、座屈係数 k_s は、以下で与えられる。

$$k_s = \begin{cases} (n_L + 1)^2 (5.35 + 4/\alpha_s^2) & \alpha_s \geq 1 \\ (n_L + 1)^2 (5.35/\alpha_s^2 + 4) & \alpha_s \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 n_L は縦方向補剛材の本数、 α_s はサブパネルにおけるアスペクト比である。本研究においては、後述の SPD-0.20-1/2 を除きサブパネルと全体パネル(ウェブ)の形状が相似であるので、その場合、 α_s は全体パネルのアスペクト比と一致し、 $\alpha_s = a/b_w$ で計算される。ここで、 a はウェブ高さである。

一方、補剛材の剛比は以下の式で与えられる。

$$\gamma_s = \frac{E \cdot I_s}{b_w \cdot D_w} \quad (3)$$

ここで、 I_s は補剛材の断面 2 次モーメント、 D_w はウェブの曲げ剛度である。本研究では、補剛材の剛比は以下の式で与えられる最適補剛材剛比の 3 倍としている^{1),3)}。なお、最適剛比は、ウェブの全体座屈とサブパネルの局部座屈が同時に発生するときの剛比と定義されている。

$$\gamma_s^* = \left(\frac{23.1}{n_L^{2.5}} - \frac{1.35}{n_L^{0.5}} \right) \cdot \frac{(1 + \alpha^{3/n_L - 0.3})^{2n_L - 1}}{1 + \alpha^{5.3 - 0.6n_L - 3/n_L}} \quad (4)$$

3. 解析モデル

本研究で用いた解析モデルは、前報の実験供試体¹⁾と同じで、その構造パラメータを表-1 に示す。ここで、モデル名における数字は順に、せん断座屈パラメータ、補剛材本数である。ただし、SPD-0.20-1/2 についてはサブパネルのアスペクト比 α_s は 1.0 であるが、ウェブ全体においては、ウェブ幅 b_w がウェブ高さ a の 1.5 倍、縦補剛材 1 本、横補剛材 2 本であるため、モデル名を上記のような表現とした。

図-2 は SPD-0.20-2 における解析モデルを示す。メ

表-1 解析モデルの寸法と構造パラメータ

モデル名	設計 値 R_w	ウェブ							補剛材							フランジ	
		a mm	b_w mm	t_w mm	α	α_s	b_w/t_w	R_w	n_L	n_T	b_s mm	t_s mm	γ_s/γ_s^*	γ_s	γ_s^*	b_f mm	t_f mm
①SPD-0.25-0	0.25	400	400	14.0	1.0	1.0	29	0.235	—	—	—	—	—	—	300	19	
②SPD-0.125-1	0.125	400	400	14.0	1.0	1.0	29	0.126	1	1	82	14	3.00	65.23	21.75	300	19
③SPD-0.20-1	0.20	500	500	11.0	1.0	1.0	45	0.201	1	1	77	11	3.02	65.74	21.75	350	22
④SPD-0.20-2	0.20	610	610	9.0	1.0	1.0	68	0.204	2	2	59	9	3.01	37.72	12.52	400	25
⑤SPD-0.20-2A	0.20	610	610	9.0	1.0	1.0	68	0.204	2	2	80	9	3.00	37.72	12.52	400	25
⑥SPD-0.20-1/2	0.20	407	610	9.0	0.67	1.0	68	0.204	1	2	59	9	3.01	37.72	12.52	400	25
⑦SPD-0.30-1	0.30	610	610	9.0	1.0	1.0	68	0.306	1	1	72	9	3.00	65.18	21.75	400	25

表-2 材料定数

鋼材	E (GPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y	ν	E_{st} (MPa)	ϵ_{st}	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
SM490Y(9mm)	206	413	0.00200	0.296	6.56	0.00130	547	25.9
SM490Y(11mm)	214	496	0.00232	0.303	3.78	0.0210	599	23.5
SM490Y(14mm)	205	482	0.00235	0.293	5.47	0.0112	594	25.1
SM490Y(19mm)	213	437	0.00205	0.286	5.13	0.0182	554	29.0
SM490Y(22mm)	209	397	0.00190	0.286	5.58	0.0130	541	26.8
SM490Y(25mm)	205	435	0.00213	0.289	5.66	0.0144	565	27.4
LY225(9mm)	200	242	0.00121	0.294	2.48	0.0246	320	57.4
LY225(16mm)	212	237	0.00112	0.300	1.83	0.0228	328	63.6

注) SPD-0.25-0, SPD-0.125-1, SPD-0.20-1 のウェブで使用されている 11mm と 14mm の鋼材は、16mm の低降伏点鋼から削りだされたものであるため、原板である 16mm の低降伏点鋼の結果を示す。

ツッシュ分割はこれまでの検討（例えば文献 6）,7）を参考に収束解が得られるようにウェブは高さ方向、幅方向ともに 25 分割、フランジは幅方向に 12 分割、補剛材はウェブの面外方向に 6 分割とした。要素には ABAQUS 要素ライブラリに定義されている 3 次元 4 節点低減積分シェル要素 S4R と 3 節点低減積分シェル要素 S3R を併用した。本解析モデルでは、初期不整として初期たわみと残留応力の影響も考慮されている^{6),7)}。初期たわみは正弦曲線を仮定し、全体的なたわみモードと局所的なたわみモードの和として以下で与えられる⁸⁾。

$$\delta_w = -\frac{a}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w}\right) + \frac{b_w}{150(n_L + 1)} \sin\left(\frac{(n_L + 1)\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{(n_L + 1)\pi y}{b_w}\right) \quad (5)$$

また、残留応力分布は図-3 に示されるような矩形分布を仮定する^{8),9)}。境界条件は、SPD は実際にはウェブの上端部、下端部において非常に剛な板で接合されているので、平面 $x=0$ で完全固定、平面 $x=a$ は水平

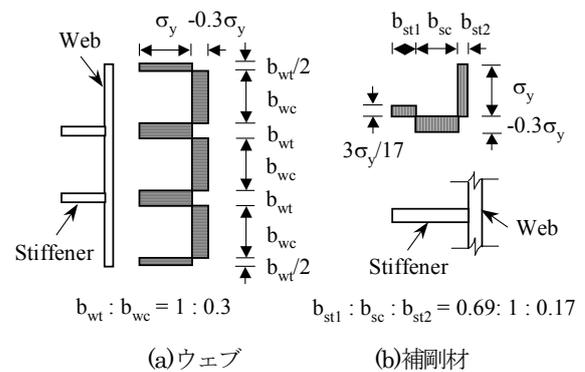
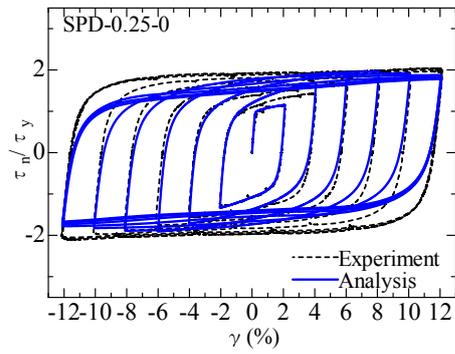
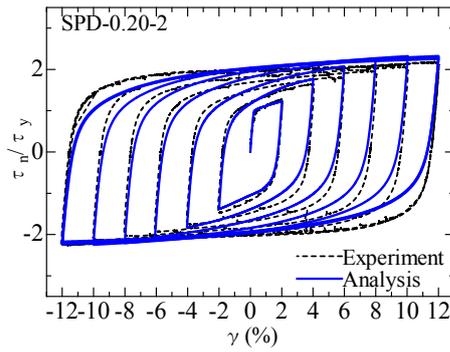


図-3 ウェブおよび補剛材の残留応力分布

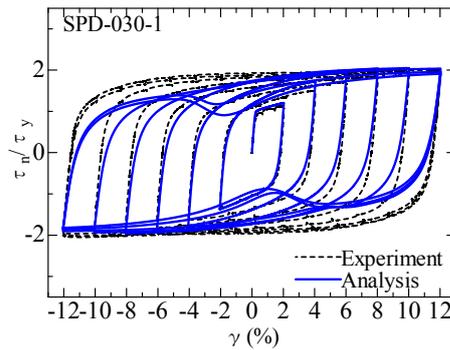
変位を与えるため、 x 方向、 y 方向のみ変位を許容している。構成則は、鋼材の繰返し特性を精度良く模擬できる修正 2 曲面モデルを用いた¹⁰⁾。本研究ではウェブに LY225、フランジと補剛材に SM490Y を用いており、表-2 に本解析で用いた鋼材の材料定数を示す。載荷は $x=a$ に位置するウェブとフランジの節点に対し強制変位を与えることにより行われ、実験と同様に要求性能である最大せん断ひずみ 12% までは正負交番



(a)



(b)



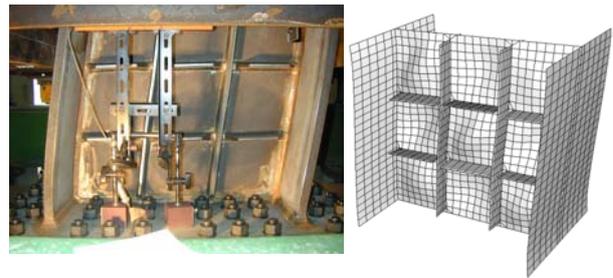
(c)

図-4 解析と実験による履歴曲線の比較

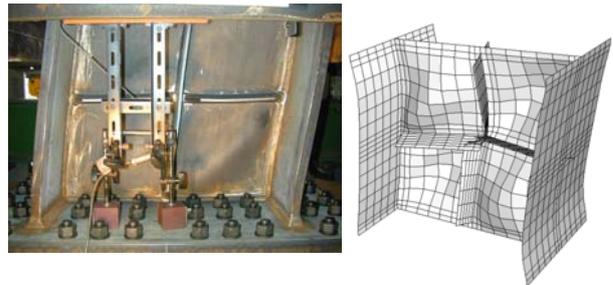
漸増荷重, その後は 12% で正負交番定振幅荷重を行った. 後者の定振幅荷重に関しては, SPD の低サイクル疲労に関する要求性能が累積塑性変形 280% であることより, その 280% を超えた回数で解析終了とした.

4. 実験結果による解析モデルの検証

本節では, 履歴曲線, 変形図, エネルギー吸収量に着目して小池ら¹⁾が行った実験結果と解析結果を比較する. 図-4 は 3 つのモデルにおける履歴曲線を示している. 縦軸, 横軸はそれぞれ平均せん断応力 τ_m , せん断ひずみ γ であり, 降伏せん断応力 τ_y , 降伏せん断ひずみ γ_y で無次元化してある. 平均せん断応力, 平均



(a) SPD-0.20-2 の-12%の2回目



(b) SPD-0.30-1 の-12%の2回目

図-5 変形図の比較

せん断ひずみは以下の式で定義される.

$$\tau_n = \frac{Q}{b_w \cdot t_w} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{\delta}{a} \quad (7)$$

ここで, 解析において SPD に作用する水平力 Q は $x=0$ に位置する節点における y 方向節点力の和で算出される. なお, 履歴曲線については SPD-0.125-1, SPD-0.20-1, SPD-0.20-2, SPD-0.20-2A および SPD-0.20-1/2 はほぼ同様の特徴を有しているため, これらのモデルの履歴曲線を付録に示しておく.

図-4 および付録の図を見ると, SPD-0.30-1 を除いて全てのモデルにおいて解析と実験は概ね一致している. ただし, 硬化域の傾きが若干異なっている. SPD-0.25-0 では解析において平均せん断ひずみ -6% 及び +8% あたりから耐力が低下し, SPD-0.30-1 では平均せん断ひずみ 12% に達した後にピンチングが生じているが, SPD-0.20-2 に関しては実験結果と精度良く一致している. これは図-5 から分かるように, 解析の方が過大な面外変形が生じているからである. 実験ではフランジとウェブとの溶接部分の板厚を上げていたが, 解析ではこれを考慮していないため, SPD-0.30-1 のような薄い SPD モデルにおいて解析と実験の結果に差が生じたと考えられる. SPD-0.20-2 に関しては, 実験及び解析において本研究の範囲の荷重では耐力が大きく低下しないために精度良く模擬できている. ただ

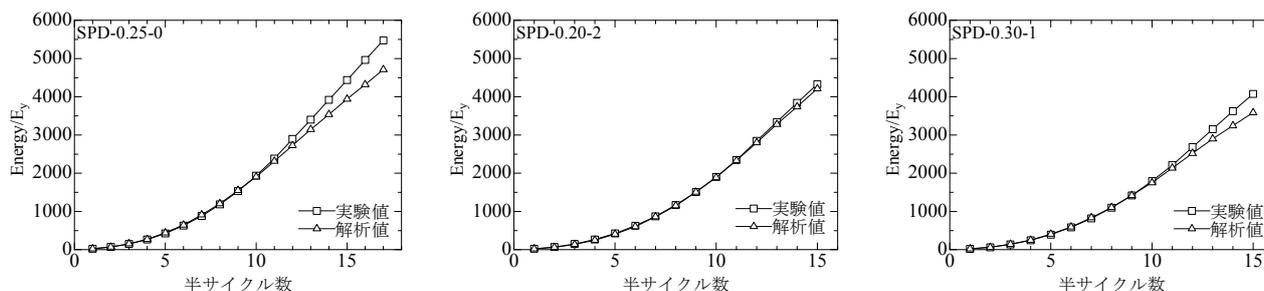


図-6 解析と実験による累積吸収エネルギーの比較

表-3 载荷終了時における累積吸収エネルギー量の誤差

解析モデル	SPD-0.25-0	SPD-0.125-1	SPD-0.20-1	SPD-0.20-2	SPD-0.20-2A	SPD-0.20-1/2	SPD-0.30-1
誤差(%)	-13.9	-3.99	-1.94	-2.69	-3.20	-3.71	-12.0

表-4 バイリニア型復元力モデルの1次剛性と2次剛性の比

解析モデル	SPD-0.25-0	SPD-0.125-1	SPD-0.20-1	SPD-0.20-2	SPD-0.20-2A	SPD-0.20-1/2	SPD-0.30-1
G/G'	72.7	61.9	61.0	56.4	60.9	38.4	65.4

し、実験では補剛材端部のまわし溶接部のき裂の貫通、進展により耐力が低下するのに対し、解析ではき裂の発生、進展を模擬できずせん断座屈により耐力が低下しているため、耐力低下までは実験を忠実に模擬できていると言えない。このことより、SPDの復元力モデルの構築にあたってはき裂の進展による耐力低下が生じる前の領域を対象とした。

また、累積エネルギー吸収量について比較してみる。図-6にエネルギー吸収量の比較を示す。縦軸、横軸はそれぞれ累積エネルギー吸収量、半サイクル数であり、前者は $E_y(=Q_y \Delta_y/2)$ で無次元化している。エネルギー吸収量に関しても、SPD-0.125-1、SPD-0.20-1、SPD-0.20-2、SPD-0.20-2AおよびSPD-0.20-1/2はほぼ同様の特徴を有しているため、SPD-0.25-0、SPD-0.20-2およびSPD-0.30-1の結果を示している(省略されたモデルのエネルギー吸収量については付録を参照されたい)。

なお、表-3には载荷終了時の累積吸収エネルギー量の実験値に対する解析値の誤差を示している。図-6を見ると、前述したように、解析においてせん断座屈による耐力低下が模擬できていないためにSPD-0.25-0及びSPD-0.30-1ではエネルギー吸収量に差が生じており、表-3よりその最終的な誤差はそれぞれ13.9、12.0%となっている。一方で、その他のモデル(SPD-0.125-1、SPD-0.20-1、SPD-0.20-2、SPD-0.20-2A、SPD-0.20-1/2)については誤差が5%以下であり精度良くエネルギー吸収量が模擬されている。したがって、ウェブのせん断座屈挙動は若干異なるものの、せん断

座屈パラメータ R_w が0.20以下のモデルであれば本解析モデルは妥当であり、精度よく実験を模擬できると考えられる。

5. 復元力モデル

本節では、SPDの復元力特性をバイリニア型移動硬化則と混合硬化則の2つモデルについて検討する。

(1) バイリニア型移動硬化則

バイリニア型移動硬化則は、図-7に示すように降伏後は一定の勾配(2次勾配)で応力が変化し、また弾性域の大きさは一定でその中心(背応力)が塑性域での応力の変化率と同じ勾配で線形的に移動するものである。必要となる材料パラメータは弾性域での傾き G と塑性域での傾き G' であり、本検討では各モデルにおける実験結果から G と G' を求めた。ここで、 G' は降伏点とSPDの要求性能であるせん断変形12%の定振幅1回目の折り返し点を直線で結び、その勾配から算出している。表-4に各モデルにおける G と G' の比を示す。なお、SPD-0.20-1/2については、せん断変形10%までしか実験が行われていないため、 G' の値が大きくなっている。

(2) 混合硬化則

混合硬化則は、塑性域での挙動を弾性域の変化、背応力の変化をもとに表現し、また弾性域や背応力の非線形的な変化を考慮した構成則である¹¹⁾。図-8に混合硬化則の概念図を示す。混合硬化則のパラメータは、

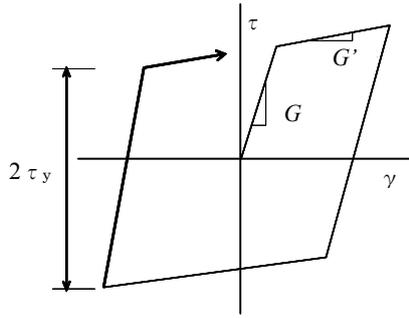


図-7 バイリニア型移動硬化則の概念図

弾性域の大きさを定める等方硬化パラメータ C_1 , C_2 と背応力を定める移動硬化パラメータ D_1 , D_2 がある。ここで、 C_1 は弾性域の最大変化量、 C_2 は塑性変形に伴う弾性域の大きさの変化を定めるパラメータ、 D_1 は初期の移動硬化係数、および D_2 は塑性変形に伴う弾性域の中心位置の変化を定めるパラメータである。この混合硬化則を LY100 よりなる座屈拘束ブレースの変形挙動の解析に用いた例がある¹²⁾。

混合硬化則では、弾性域の大きさ τ'_y は以下の式(8)で表される。

$$\tau'_y = \tau_y + C_1 \{1 - \exp(-C_2 \bar{\gamma}_p)\} \quad (8)$$

ここで、 τ_y は初期のせん断降伏応力、 $\bar{\gamma}_p$ は相当せん断塑性ひずみであり、せん断塑性ひずみを γ_p とすると式(9)で表される。

$$\bar{\gamma}_p = \int |d\gamma_p| \quad (9)$$

また、背応力 α_i は以下の式(10)で表される。

$$\alpha_i = \frac{D_1}{D_2} \{1 - \exp(-D_2 \cdot \gamma_{p,i})\} + \alpha_0 \exp(-D_2 \cdot \gamma_{p,i}) \quad (10)$$

ここで $\gamma_{p,i}$ は塑性ひずみであり、 α_0 は積分定数で $\gamma_{p,i} = 0$ の時の背応力である。以上より、混合硬化則では降伏後の応力は式(11)で表される。

$$\tau_i = \tau_y + C_1 \{1 - \exp(-C_2 \bar{\gamma}_p)\} + \frac{D_1}{D_2} \{1 - \exp(-D_2 \cdot \gamma_{p,i})\} + \alpha_0 \exp(-D_2 \cdot \gamma_{p,i}) \quad (11)$$

式(11)をみると、弾性域の大きさである第1項と第2項の和は履歴を繰り返すと相当塑性ひずみが大きくなることより一定値に収束するため、その際の降伏後の挙動は背応力である第3項と第4項の和に依存し、各サイクルで同じ形状のループを繰り返す。この状態を定常サイクルと呼び、以上を考慮して移動硬化パラメータを定める。

定常サイクルでは、背応力は式(12)で表される。

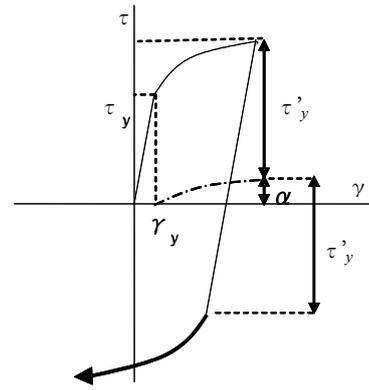


図-8 混合硬化則の概念図

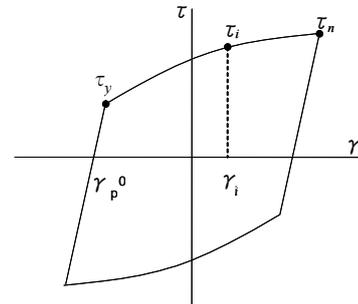


図-9 定常サイクルの応力-ひずみ関係の概要

$$\alpha_i = \tau_i - \tau_s \quad (12)$$

ここで τ_s 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(13)で表される。

$$\tau_s = \frac{\tau_y + \tau_u}{2} \quad (13)$$

式(11)より背応力もまた、 $\gamma_{p,i}$ が大きくなると D_1/D_2 に収束する。背応力の収束値を $\alpha_s (=D_1/D_2)$ とし、式(12)より次の式(14)が成立すると仮定する。

$$\alpha_s = \frac{D_1}{D_2} = \tau_u - \tau_s = \tau_u - \frac{\tau_y + \tau_u}{2} = \frac{\tau_u - \tau_y}{2} \quad (14)$$

ここで、本来は定常サイクルの実験データを得るために定振幅载荷の実験結果が必要であるが、本実験ではそのような実験データは得られていない。本研究では、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、式(12)、(13)より背応力の実験値を算出した。例として、SPD-0.20-2 の場合の背応力-せん断塑性ひずみ関係(実験結果は破線)を図-10に示す。その際、せん断変形12%の1回目の最大せん断応力を τ_u とした。なお、履歴ループからは明確に降伏点(折れ曲がり点)を判断しにくいいため、常に降伏点は τ_y であると仮定している。一方、この実験結果と比較することで

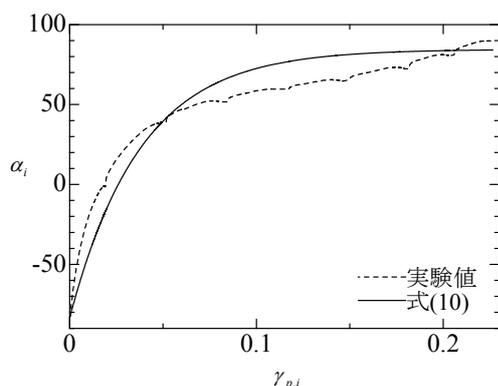


図-10 背応力の変化

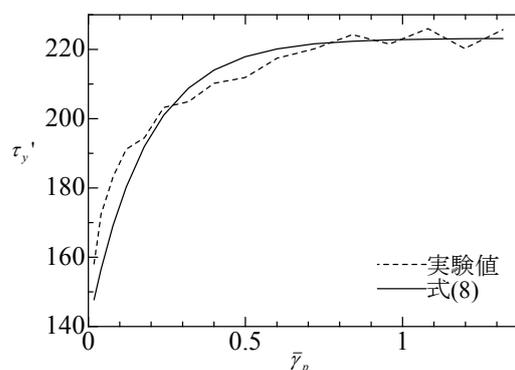


図-11 弾性域の大きさの変化

表-5 各モデルで用いる混合硬化則のパラメータ

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-0.25-0	71.3	4.85	2.09×10^3	29.7
SPD-0.125-1	83.9	4.68	3.62×10^3	38.0
SPD-0.20-1	83.4	5.80	2.05×10^3	23.9
SPD-0.20-2	83.4	5.52	2.23×10^3	26.4
SPD-0.20-2A	78.6	5.35	2.16×10^3	27.1
SPD-0.20-1/2	102.7	7.39	2.92×10^3	28.9
SPD-0.30-1	68.5	5.99	2.42×10^3	34.3

表-6 各復元力モデルを用いた場合の
累積吸収エネルギー量における解析値の誤差

	バイリニア型移動硬化則 における誤差[%]	混合硬化則におけ る誤差[%]
SPD-0.25-0	-39.7	+4.86
SPD-0.125-1	-44.3	+9.31
SPD-0.20-1	-41.3	+5.88
SPD-0.20-2	-41.6	+5.01
SPD-0.20-2A	-41.7	+4.43
SPD-0.20-1/2	-46.5	+5.16
SPD-0.30-1	-38.0	+5.78

式(10)での係数 D_1, D_2 を求めることができる。ただし、式(14)の関係もあるので、実質的には1つの係数を最小2乗法により求めればよい。

また、等方硬化パラメータ C_1, C_2 については、実験データから各サイクル終了時の弾性域の大きさ $\tau_y' (= (\tau_y + \tau_{u,i})/2)$ 、 $\tau_{u,i}$ は折り返し点でのせん断応力)とそのときの相当塑性ひずみ $\bar{\gamma}_p$ を抽出し、式(8)と比較することにより C_1 と C_2 が求められる。図-11にSPD-0.20-2の場合の実験値と式(8)の比較を示す。以上より算出された各モデルの混合硬化パラメータを表-5に示す。なお、SPD-0.20-1/2の等方硬化パラメータの値が他のモデルに比べて大きい。これは平均せん断ひずみ10%までしか実験が行われておらず、相当塑性ひずみが相対的に小さい段階において弾性域の大きさが収束したと見なしたためである。

(3) 各復元力モデルの妥当性の検証

図-12に応力-ひずみ関係及びエネルギー吸収量における実験値との比較、また表-6に载荷終了時における累積エネルギー吸収量の実験値に対する解析値の誤差を示す。それぞれの図において、縦軸、横軸は図-4、図-6と同様である。なお、全てのモデルにおいてほぼ同様の特徴を有する結果となったため、図-

12ではSPD-0.20-2のみ結果を示す(省略されたモデルの履歴曲線とエネルギー吸収量については付録を参照されたい)。図-12より、実験から得られたSPDの履歴曲線は等方硬化的にも大きく広がっているために、全てのモデルにおいてバイリニア型移動硬化則では履歴ループが一致せず、またエネルギー吸収量も誤差が40%程度過小評価する結果となった。一方、混合硬化則では硬化域の挙動には多少の差が見られ実験値よりも履歴ループが外側に位置するものの、弾性域の広がりやを考慮しているため履歴ループは精度良く一致している。またエネルギー吸収量に関しても、混合硬化則では各サイクル数において多少大き目に評価しているものの、最終的な累積エネルギー吸収量の誤差は10%以内に収まっている。

(4) 混合硬化パラメータの提案

地震応答解析をする際には、制震部材(制震デバイス)について簡易な復元力モデルが必要となる。前節より高機能SPDの復元力モデルは、バイリニア型移動硬化則より混合硬化則モデル化のほうが妥当である。地震応答解析において導入されるSPDの復元力モデルパラメータは該当するSPDの実験により得られれば理想であるが、それは非常に困難である。そこで、

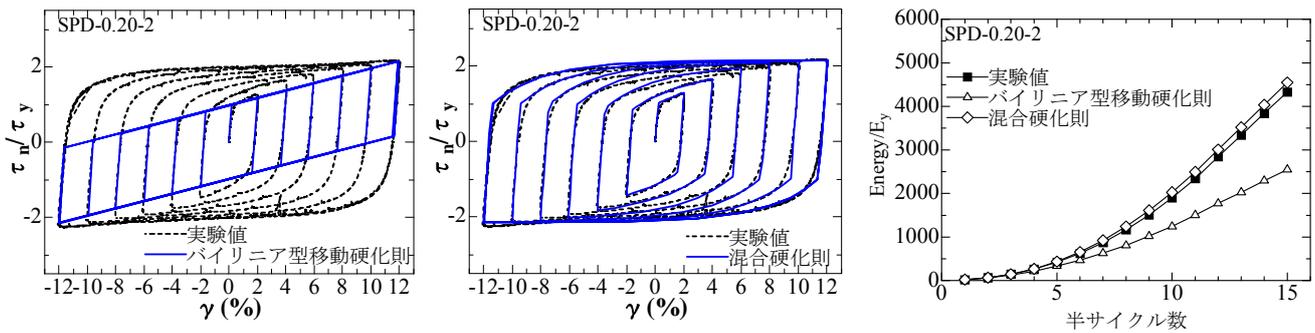


図-12 2つの復元力モデルによる履歴曲線と累積吸収エネルギーの比較

表-7 混合硬化パラメータの平均値 (推奨値)

等方硬化パラメータ		移動硬化パラメータ	
$C_{1,ave}$	$C_{2,ave}$	$D_{1,ave}$	$D_{2,ave}$
78.2	5.37	2.43×10^3	29.9

表-8 混合硬化パラメータの平均値を用いた場合の累積吸収エネルギー量の誤差

解析モデル	SPD-0.25-0	SPD-0.125-1	SPD-0.20-1	SPD-0.20-2	SPD-0.20-2A	SPD-0.20-1/2	SPD-0.30-1
誤差[%]	+10.5	+1.89	+5.37	+3.72	+5.64	-6.57	+10.5

本節では、高機能 SPD における混合硬化パラメータ値の提案を行う。

表-5を見ると、SPD-0.20-1/2を除いて混合硬化パラメータはモデルによらず、ほぼ近い値であることが分かる。よって、各混合硬化パラメータの平均値を復元力モデルの提案値として、そのパラメータ値を用いた履歴挙動のエネルギー吸収量を計算し、その妥当性を検討する。ここで、SPD-0.20-1/2は外れ値として平均する際に除いた。これは、前述したように、他のモデルは12%まで実験したことに対して、SPD-0.20-1/2は平均せん断ひずみ10%までしか実験が行われておらず、10%までの実験結果から算出された混合硬化則のモデルパラメータの値が他のモデルで12%までの実験結果によるものと異なったためである。各混合硬化パラメータの平均値を上記の提案された混合硬化パラメータを用いて算出され表-7に示す。また、载荷終了時における累積エネルギー吸収量の誤差を表-8に示す。なお、表-8は実験値に対する解析値の誤差である。表-8を見ると、SPD-0.25-0とSPD-0.30-1では誤差が+10.5%となっているが、それら以外のモデルにおいては10%以内に誤差が収まっている。したがって、せん断座屈が生じないような幅厚比 (R_w は0.2以下)で、かつ十分に剛な補剛材で補剛されたSPDであれば、本提案復元力モデルは非常良い精度を有することが分かる。

6. 結言

本研究では、数値解析により、高機能 SPD の弾塑性挙動を示すと同時に、実験結果と解析結果を踏まえ、高機能 SPD の復元力モデルについて検討した。以下に本研究によって得られた主な結論をまとめる。

- 1) 本検討で用いた解析モデルは、高機能 SPD の弾塑性繰り返し挙動を概ね模擬できる。
- 2) 高機能 SPD の復元力特性をバイリニア型移動硬化則で模擬すると、エネルギー吸収が過小評価となる。一方、混合硬化則で模擬すると精度良く一致する。
- 3) 混合硬化則の復元力モデルの各パラメータの値を求め、その妥当性を実験結果により検証した。

なお、最大せん断ひずみと累積せん断ひずみの設定については、研究途中⁴⁾であるが、種々の地震動による SPD の要求性能を明らかにする必要がある。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省私学助成ハイテクリサーチセンター整備事業で名城大学に設置された「高度制震実験・解析研究センター」の助成を受けて実施されたものである。また、橋梁用デバイス研究会 (株) 横河ブリッジ、高田機工 (株)、川口金属工業 (株) の皆様に種々のコメントをいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

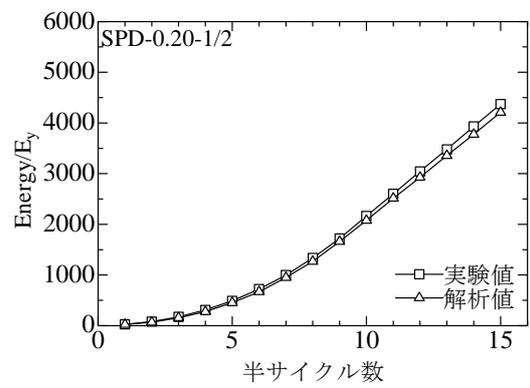
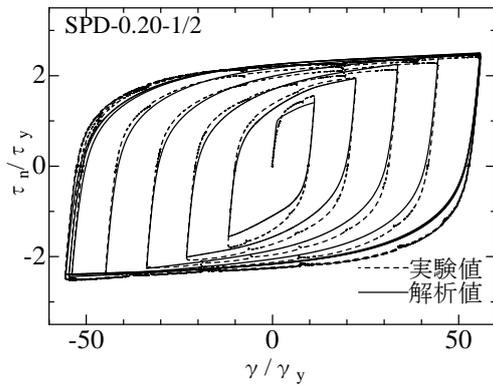
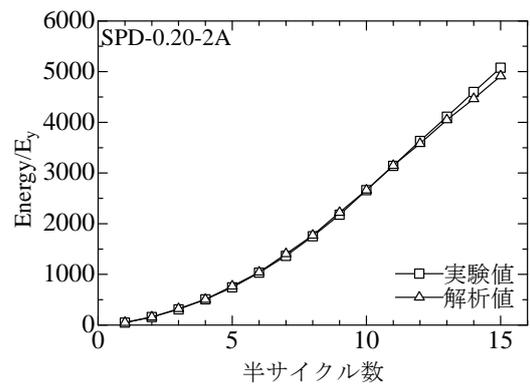
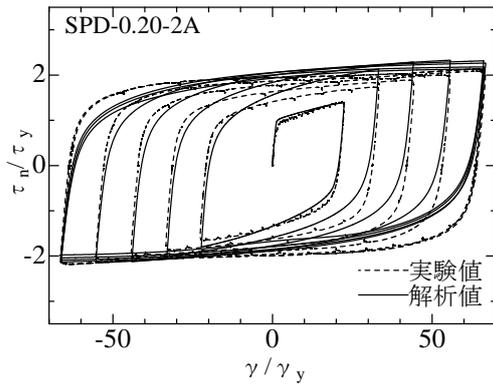
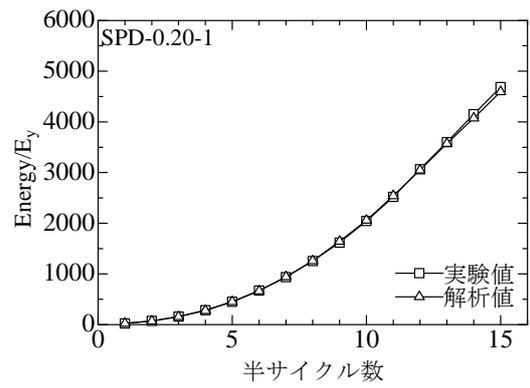
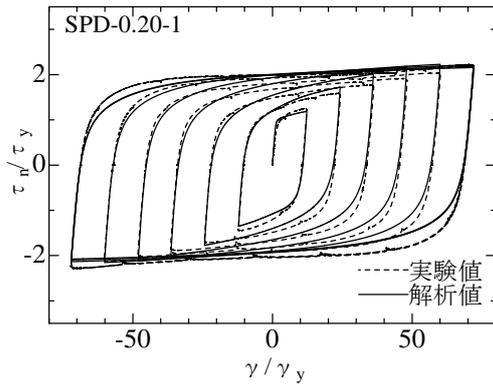
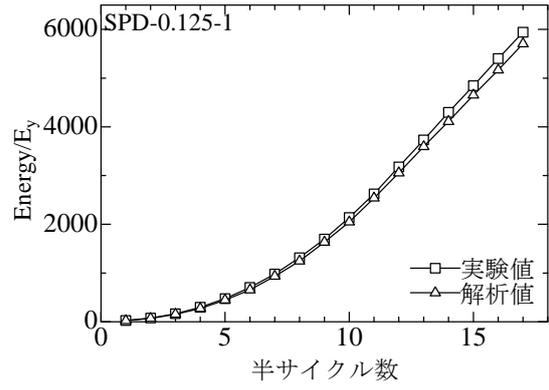
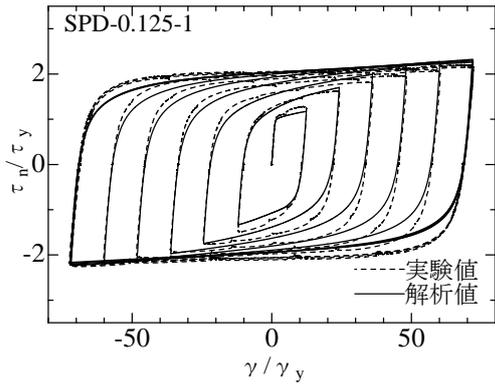


図-A1 各モデルにおける履歴曲線と累積吸収エネルギー

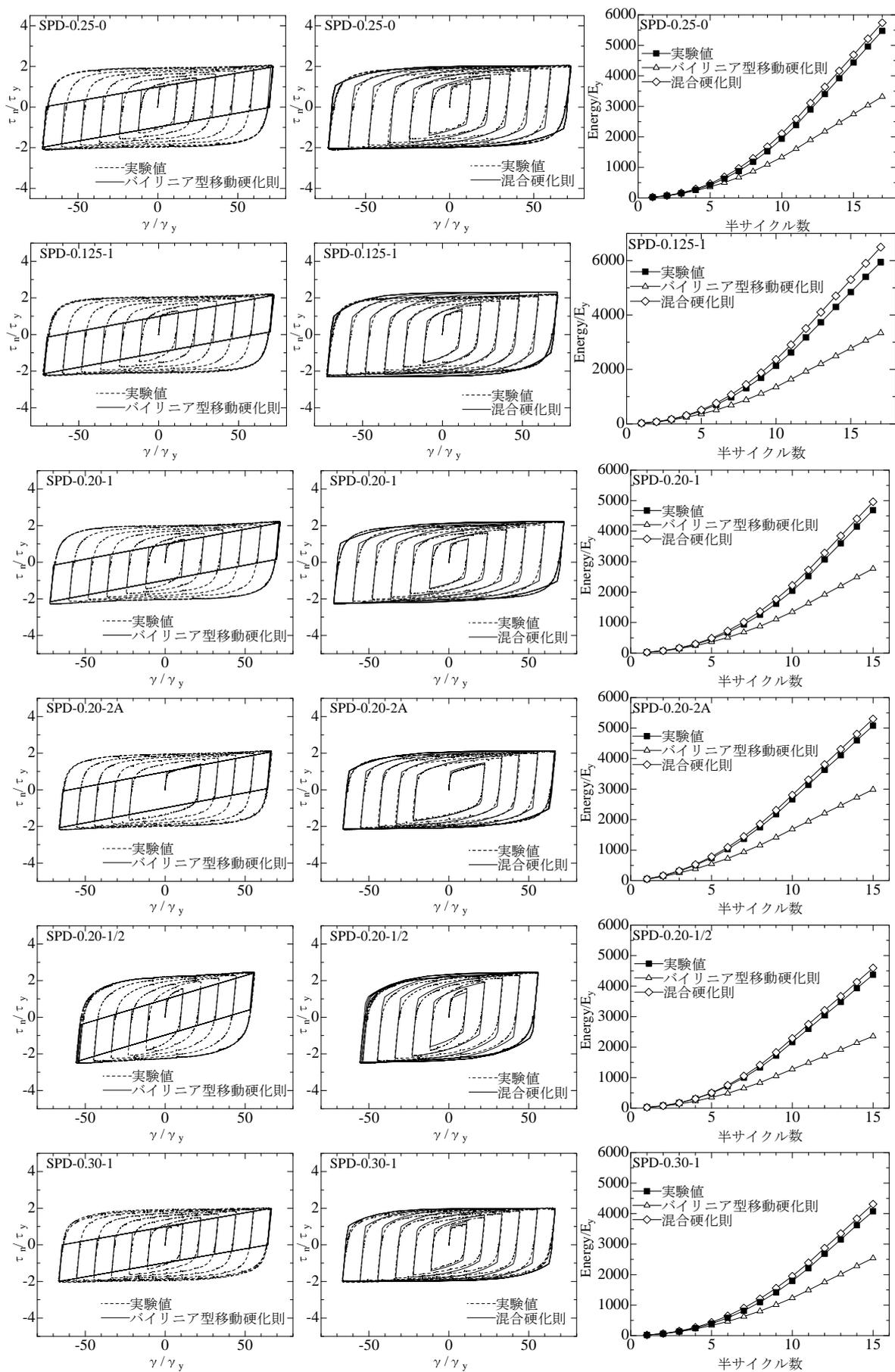


図-A2 各モデルの履歴曲線とエネルギー吸収量の比較

付録 各モデルにおける実験と解析の比較

図-A1 に履歴曲線とエネルギー吸収量について解析結果と実験結果との比較を示す。SPD-0.20-1, SPD-0.20-2, SPD-0.20-2A を見ると、実験ではせん断座屈パラメータが 0.2 以下のモデルにおいては補剛材端部のまわし溶接部においてき裂が貫通、進展し耐力が低下し、補剛材が両面配置と片面配置、または補剛材の段数によって結果に差が生じた。しかし解析ではき裂の発生及び進展を模擬できないため、これらのモデルにおいて大きな差は生じない結果となった。

次に図-A2 に履歴曲線をバイリニア型移動硬化則及び混合硬化則を用いてモデル化したときの、履歴曲線、エネルギー吸収量における実験値との比較を示す。全ての SPD モデルにおいて、混合硬化則を用いると精度良く履歴曲線、エネルギー吸収量を模擬できることが分かる。

参考文献

- 1) 小池洋平, 谷中聡久, 宇佐美勉, 葛 漢彬, 尾下里治, 佐合大, 鶴野禎史: 高機能補剛せん断パネル型ダンパーの開発に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.372-381, 2008.3.
- 2) 宇佐美勉: 高機能制震ダンパーの開発研究, 第 10 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.11-22, 2007.2.
- 3) Chen, Z.Y., Ge, H.B. and Usami, T.: Numerical Study on Development of Hysteretic Model for Stiffened Steel Shear Panel Damper, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.573-582, 2006.3.
- 4) Ge, H.B., Chen, X. and Matsui, N.: Seismic Demand on Shear Panel Dampers Installed in Steel Framed Bridge Pier Structures, to be published in *Journal of Earthquake Engineering*.
- 5) 葛 漢彬, 日沖堅治, 宇佐美勉: 鋼アーチ橋に設置した座屈拘束ブレースの応答値, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 論文番号 136, 2005.8.
- 6) Chusilp, P. and Usami, T.: New Elastic Stability Formulas for Multiple-Stiffened Shear Panels, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.128, No.6, pp.833-836, 2002.6.
- 7) 宇佐美勉, 葛 漢彬: 薄板集成短柱の強度推定法, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.171-178, 1996.3.
- 8) 渡辺智彦, 葛 漢彬, 宇佐美勉: 繰り返し荷重を受ける補剛板の強度と変形能に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.185-195.
- 9) 宇佐美勉編: 座屈設計ガイドライン (改訂第 2 版), 土木学会, 2005.11.
- 10) Shen, C., Mamaghani, I. H. P., Mizuno, E. and Usami, T.: Cyclic Behavior of Structural Steels. II: theory. *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 121(11), pp.1165-1172, 1995.
- 11) Lemaitre, J. and Chaboche, J.L.: *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, 1990.
- 12) 千田耕大, 藤田将之, 葛西 昭, 宇佐美勉, 渡辺直起: 鋼種の異なる座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.339-347, 2006.

(2009. 9. 24受付)