

LENS 型せん断パネルダンパーの損傷度評価

日本鑄造 (株) 正会員 ○石山 昌幸  
 日本鑄造 (株) 正会員 原田 孝志  
 日本鑄造 (株) 正会員 山崎 信宏

(株) 東光コンサルタンツ フェロー 高久 達将  
 (株) 東光コンサルタンツ 正会員 陳 鋒  
 愛知工業大学 正会員 青木 徹彦

1. はじめに

筆者らが開発を行っている、低降伏点鋼材 (LY100) を用いた LENS 型せん断パネルダンパー (以下, LSD) は、鋼材の塑性変形により減衰を付加させることから、地震時に繰返し载荷を受けると劣化損傷を伴う。劣化損傷を受け続けた LSD は、亀裂を生じることから、LSD の損傷度を的確に評価することが必須となる。

そこで、これまで12-6試験体により行った静的漸増繰返し試験 ( $\delta y \sim 9 \delta y$ ,  $\delta y=5\text{mm}$ ), 静的・動的正弦波試験 (周期: slow, 0.5, 1.0, 2.0 秒, 片振幅: 5, 10, 15, 20, 30, 40mm), 地震波試験 (レベル2地震動, 変位制御方式) の結果<sup>1)~3)</sup> から、LSDの損傷度評価について検討を行った。

2. マイナー則による損傷度評価

前述のように、LSDは、地震などの外力により、図1に示すような振幅 ( $x_i$ ) を生じ、同時に劣化損傷を伴う。LSD が受ける劣化損傷度は、振幅 ( $x_i$ ) の大きさと累積変形性能 (cumulative displacement capacity, CDC) に依存する (表1 参照)。そのため、地震波のように、不規則な振幅 ( $x_i$ ) の組合せに対するLSDの損傷度評価は、マイナー則に基づき行う。具体的には、各々の振幅 ( $x_i$ ) に対して、劣化損傷度を求め、それらの和が、ある一定値以下となることを確認する。

3. LSDの劣化損傷度とDamage pass (Dtp\*)

LSDの静的および動的正弦波試験から、振幅 ( $x_i$ ) とCDC ( $y_i$ ) との関係が求まる (図2 参照)。振幅 ( $x_i$ ) とCDC ( $y_i$ ) との関係は、試験結果から最小二乗法により整理すると、式 (1) が得られる。この式を簡略化すると、式 (2) が得られる。

$$y = 17497 x^{-1.0848} \quad (1)$$

$$xy = 15100 \quad (2)$$

式 (2) より、LSD が亀裂に至るまでの繰返し回数 (Nf : number of cycles to failure, ライフサイクル) は、式 (3) で与えられる。一方、劣化損傷度 (Df) は、式 (4) で定義される。

LSDの損傷度評価は、マイナー則に基づき、蓄積された劣化損傷度 (Df) が、ある一定値に達した時に生じると考え、式 (4) より算出される劣化損傷度 (Df) の総和 ( $D_1$ ) が、

式 (5) に示すように、1 以下であれば安全と言える。

$$N_f = 15100/4x^2 \quad (3)$$

$$D_f = 1/N_f \quad (4)$$

$$D_1 = \sum (1/N_f) < 1 \quad (5)$$

表1は、同振幅を周期1.0秒で与えた動的正弦波試験から、LSDが亀裂に至るまでの繰返し回数 (cf) と亀裂までの距離 (CDC試験値) を示しており、併せて、式 (3) と式 (4) より算出した、振幅 ( $x_i$ ) に対するLSDのCDCと亀裂予測値 (Nf), 1 サイクルあたりの劣化損傷度 (Df) を示している。

例えば、LSD に片振幅 20mm を与える場合、1 サイクルあたりの劣化損傷度 (Df) は 0.1060, 亀裂予測値 (Nf) は 9.4 と算出される。

一方、LSDの振動振幅量から、LSDの損傷度を評価する場合には、それぞれの振幅 ( $x_i$ ) により劣化損傷度が異なるため、振幅 ( $x_i$ ) の大きさに応じて、劣化係数eを乗じる必要がある。

12-6 試験体の場合、表1より、振幅 ( $x_i$ ) の設計基準値を 18.875mmとすると、各振幅 ( $x_i$ ) に対する劣化係数e

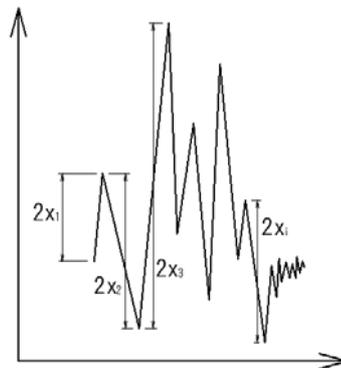


図1 LSDに生じる振幅例

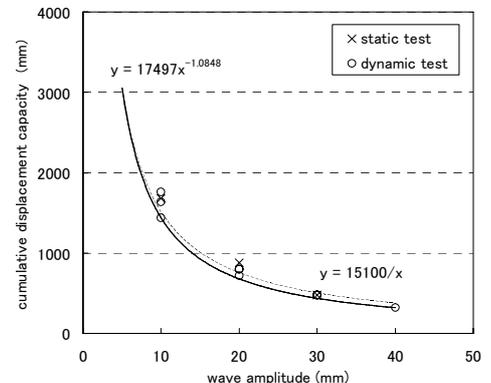


図2 片振幅とCDCとの関係

表1 動的 (周期1.0秒) 正弦波試験結果と予測値

片振幅 (変位) x (mm)	試験結果		予測値			
	cf	CDC試験値 d (mm)	変形容量 x*d (mm <sup>2</sup> )	CDC y=15100/x	Nf 15100/4x <sup>2</sup>	Df 1/Nf
5	168	3360	16800	3020	151.0	0.0066
10	44	1760	17600	1510	37.8	0.0265
20	10	800	16000	755	9.4	0.1060
30	4	480	14400	503	4.2	0.2384
40	2	320	12800	378	2.4	0.4238
設計基準値 (平均値を用いる)						
18.875			15100	800	10.6	0.0944

キーワード: せん断パネルダンパー, 低降伏点鋼, 制震装置, 劣化損傷, マイナー則, 機能分離型支承

連絡先: 〒210-9567 神奈川県川崎市川崎区白石町2-1 日本鑄造 (株) TEL: 044-355-5033 FAX: 044-333-4575

は、 $e = x_i / 18.875$  となり、 $D_{tp}^*$ は、式 (6) で与えられる。また、LSDの劣化損傷度については、式 (6) で得られる $D_{tp}^*$ と設計基準値 (18.875mm) に対する $D_{tp}^*$ の限界値 ( $D_2=800\text{mm}$ ) との比をそれぞれ求め、その総和 ( $D_2$ ) が、式 (7) に示すように、1 以下となることを確認する。

$$D_{tp}^* = \sum(\text{劣化係数}e) \cdot (\text{振幅}x_i) = \sum(4x^2/18.875) \quad (6)$$

$$D_2 = \sum(D_{tp}^*/800) < 1 \quad (7)$$

このように、LSDの損傷度評価は、式 (5) ないし式 (7) により行うことができる。なお、これら二種類の方法は、いずれも式 (2) に基づいているため、同じ解を得る。

#### 4. 漸増繰返し試験の劣化損傷度と $D_{tp}^*$

漸増繰返し試験に対し、劣化曲線から求めたLSDの劣化損傷度 ( $D_1$ あるいは $D_2$ ) と $D_{tp}^*$ を表2に示す。

劣化損傷度 ( $D_1$ あるいは $D_2$ ) は、 $7\delta y$ 時に0.927となり、 $D_{tp}^*$ は741.7mmとなっている。劣化損傷度 ( $D_1$ あるいは $D_2$ ) は、おおよそ1に近いことから、漸増繰返し試験における亀裂の発生は、 $7\delta y$ 前後と予測される。なお、先に実施している、静的漸増繰返し試験では、 $9\delta y$ 時に亀裂を生じている。

このことから、LSDの限界振幅は  $7\delta y \sim 8\delta y$  となり、 $D_{tp}^*$ の限界値は800mmとなる(式(2)より、 $y=15100/18.875=800$ )。

#### 5. 地震波試験の劣化損傷度と亀裂予測値

表3に、地震波試験の結果と劣化曲線より求めたLSDの $D_{tp}^*$ と劣化損傷度 ( $D_2$ )、亀裂予測値 (Nf) を示す。

地震波試験において、LSDが亀裂に至った履歴回数 (cf) は、caseE1 試験で5回、caseE2 試験およびcaseE3 試験では6回となっており、いずれのケースにおいても、劣化損傷度 ( $D_2$ ) から算出する亀裂予測値 (Nf) とほぼ一致する結果となった。

### 6. まとめ

本検討により得た結果を以下に示す。

- 12-6 試験体による静的・動的正弦波試験結果から劣化曲線を構築し、マイナー則に基づいて、LSDの損傷度評価を行った。
- LSDに亀裂が生じるまでの繰返し回数 (Nf) と劣化損傷度 ( $D_f$ ) は、振幅 ( $x_i$ ) の二乗に比例する。
- 劣化曲線から求めた漸増繰返し試験の劣化損傷度 ( $D_1$ あるいは $D_2$ ) は、 $7\delta y$ 時に0.927であり、おおよそ1に近いことから、LSDの限界振幅は、 $7\delta y \sim 8\delta y$ となる。また、 $D_{tp}^*$ の限界値は、式 (2) から800mmとなる。
- 地震波試験により、各試験ケースにおいて、LSDが亀裂に至る履歴回数 (cf) と、劣化損傷度 ( $D_2$ ) から算出した亀裂予測値 (Nf) は、ほぼ一致した。

#### 参考文献

- 石山, 原田, 他: 低降伏点鋼を用いた LENS 型せん断パネルダンパーの静的性能確認試験, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009.9
- 山崎, 原田, 他: 低降伏点鋼を用いた LENS 型せん断パネルダンパーの動的性能確認試験, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009.9
- 山崎, 原田, 他: LENS 型せん断パネルダンパーの地震波による性能確認試験, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9
- T. Takaku, F. Chen, T. Harada, M. Ishiyama, N. Yamazaki, T. Aoki, Y. Fukumoto: Static and dynamic behavior of Lens-type shear panel damper for highway bridge bearing, SDSS'Rio 2010, 2010.9
- T. Takaku, F. Chen, Y. Imai, T. Harada, M. Ishiyama, N. Yamazaki, T. Aoki, Y. Fukumoto: Design and experimental performance evaluation of lens-type shear panel dampers for highway bridge bearings. PSSC2010, October 20~22, Beijing

表2 劣化曲線から算出した LSD の劣化損傷度 (漸増波試験)

荷重	片振幅	累積変位	予測回数	劣化	$D_1$	劣化係数	劣化振幅	$D_{tp}^*$	$D_2$
case	(変位)	$\Sigma(4x)$	(Nf)	損傷度	$\Sigma(1/Nf)$	e	$e \cdot x$	$\Sigma(4e \cdot x)$	$\Sigma(D_{tp}^*/800)$
( $\delta y$ )	x(mm)	(mm)	$15100/4x^2$	1/Nf		$x/18.875$	(mm)	(mm)	
1	5	20	151.0	0.0066	0.0066	0.2649	1.32	5.3	0.0066
2	10	60	37.8	0.0265	0.0331	0.5298	5.30	26.5	0.0331
3	15	120	16.8	0.0596	0.0927	0.7947	11.92	74.2	0.0927
4	20	200	9.4	0.1060	0.1987	1.0596	21.19	158.9	0.1987
5	25	300	6.0	0.1656	0.3642	1.3245	33.11	291.4	0.3642
6	30	420	4.2	0.2384	0.6026	1.5894	47.68	482.1	0.6026
7	35	560	3.1	0.3245	0.9272	1.8543	64.90	741.7	0.9272
8	40	720	2.4	0.4238	1.3510	2.1192	84.77	1080.8	1.3510
9	45	900	1.9	0.5364	1.8874	2.3841	107.28	1509.9	1.8874
限界変位	35				$D_1 < 1$			800.0	$D_2 < 1$

表3 地震波の試験結果と予測値

case	(地震波試験結果)				(予測値)							
	履歴回数	最大ひずみと変位			最小ひずみと変位			$D_{tp}$	$D_{tp}^*$	$D_2$	予測回数	
	(cf)	(mm)	(%)	( $\delta / \delta y$ )	(mm)	(%)	( $\delta / \delta y$ )	(mm)	(mm)	$\Sigma(D_{tp}^*/800)$	(Nf)	
E1	5	33.6	21.5	6.7	-26.2	-16.8	-5.2	325	183	0.2288	4.4	
E2	6	22.9	14.7	4.6	-29.3	-18.8	-5.9	322	160	0.2000	5.0	
E3	6	14.8	9.5	3.0	-32.8	-21.0	-6.6	235	124	0.1549	6.5	