

周囲拘束型鉛ダンパーの減衰性能に関する一考察

Experimental Study on Damping Performance of Peripheral Restraining Lead Damper

原田 浩之 HIROYUKI HARADA

鈴木 利哉 TOSHIYA SUZUKI

鈴木 亨 TORU SUZUKI

周囲拘束型鉛ダンパーは、高いエネルギー吸収能力と優れた繰り返し耐久性を有する制震部材であるが、減衰性能の各種依存性については未だ明らかにされていない。そこで筆者らは、動的せん断実験を実施し減衰性能の各種依存性について検討した。その結果、累積エネルギー吸収量・雰囲気温度・振動数の違いが本ダンパーの減衰性能に及ぼす影響が特定できた。また、それら依存性を考慮した減衰力のせん断変形依存式が求まった。

キーワード：制震、履歴ダンパー、鉛プラグ、積層ゴム、エネルギー吸収、依存性

Peripheral Restraining Lead Damper has the high-energy absorbing capacity, but the dependency of the influence factors on the damping characteristics is not still made clear. The dynamic tests were executed to clarify the dependency. As a result, it was specified that the damping performance depends on the amount of cumulative energy absorption, the temperature, and the frequency. In addition, the relational expression of the damping force to the shear deformation, which contained the influence of those dependencies, was provided.

Key Words: Response control, Hysteretic damper, Lead plug, Laminated rubber, Energy absorption, Dependent property

1. はじめに

純度の高い鉛は優れた塑性変形能力と再結晶能力を有しており、履歴型ダンパーのエネルギー吸収部材に適した材料である。それゆえ、免震構造用としては、1980年代後半にU型鉛ダンパー¹⁾や鉛プラグ入り積層ゴム²⁾が開発され、多くの建物で使用されている。一方、制震構造用に関しては、いくつかの鉛ダンパーが過去に開発されているものの、コストに見合った減衰性能が発揮できなかったり、取り扱いや維持管理が難しかったりしたために、現在ではほとんど使用されなくなっている。そこで筆者らは、鉛プラグ入り積層ゴムの機構を制震構造用のダンパーに応用し、小変形時から高い減衰性能を発揮すると共に、繰り返し変形に対しても安定したエネルギー吸収能力を保持し続けられるメンテナンスフリーの履歴型制震ダンパー(周囲拘束型鉛ダンパー)を開発し実用化した。

本報は、周囲拘束型鉛ダンパーの減衰性能の累積エネルギー吸収量依存性・雰囲気温度依存性・振動数依存性を明らかにすると共に、それら依存性を考慮した復元力モデルを構築するために、既報³⁾で示したせん断変形依存性について再検討した結果を報告するものである。

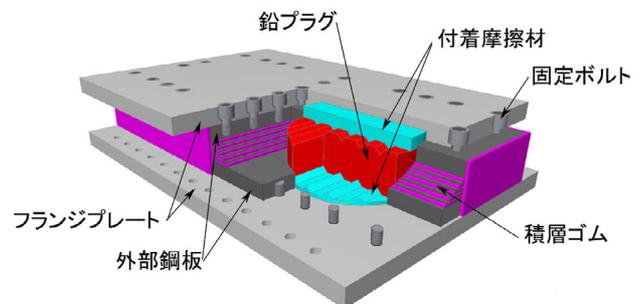


図-1 周囲拘束型鉛ダンパーの構成

2. 周囲拘束型鉛ダンパーの概要

周囲拘束型鉛ダンパーは、免震部材である鉛プラグ入り積層ゴムの減衰力発生メカニズムを制震構造用のダンパーに応用したものであり、構造物の層間変形により鉛プラグを塑性変形させ、運動エネルギーを塑性履歴に伴う熱エネルギーに変換して振動を減衰させる履歴型の制震ダンパーである。その構造は、図-1に示すように立方体の積層ゴム体の孔内に、円柱の鉛プラグと突起を持つ付着摩擦材を同時に加圧充填し、フランジプレートを

取り付けした簡単なものであるが、そこには、鉛直荷重（長期面圧）が作用しない状態でも安定したエネルギー吸収が行えるようにすると共に、制震ダンパーの通常の変形レベルである数cm程度の変形に対して高い減衰性能を発揮できるようにするための工夫が盛り込まれている。その工夫とは、

- ①鉛プラグとの接触面をV型にした付着摩擦材を鉛プラグとフランジプレートとの間に挿入し、鉛プラグと鋼材のせん断面での付着力を増すことで、応力伝達が確実にできるようにしていること
- ②鉛プラグを高圧力(40~50N/mm²)で積層ゴム体の孔内に圧入し、せん断変形により鉛プラグの体積変化が起こった場合でも、鉛プラグの拘束力が解放されないようにしていること
- ③部材全断面積に対する鉛プラグ断面積の占有率を高くし、積層ゴム体のせん断剛性を低く抑えながら鉛プラグのエネルギー吸収量を増すことで、等価減衰定数が高くなるようにしていること
- ④積層ゴム体のゴム層総厚を薄くし、鉛プラグのせん断ひずみ度を大きくすることで、より多くのエネルギーを吸収できるようにしていること

であり、これらの工夫により、周囲拘束型鉛ダンパーは小変形時から高い減衰性能を発揮すると共に、繰り返し変形に対しても安定したエネルギー吸収能力を保持し続けることが可能となっている。

3. 実験概要

周囲拘束型鉛ダンパーの減衰性能の累積エネルギー吸収量依存性、雰囲気温度依存性、振動数依存性の定量的な評価を行うと共に、それら依存性を考慮した荷重(減衰力)とせん断変形の関係式を求めるために、動的せん断実験を行った。

(1) 試験体

表-1に試験体の諸元を、図-2に試験体の概要を示す。試験体は同一サイズのものが全部で6体あり、累積エネルギー吸収量依存性、雰囲気温度依存性、振動数依存性を確認するために各1体を使用し、それら依存性を考慮した荷重とせん断変形の関係式を求めるために残り3体を使用した。なお、表中に示した鉛プラグせん断変形部の融解エネルギーは、鉛プラグのせん断変形部(ゴム層と一緒にせん断変形する総高さ20mmの部分)を全て融解するまでに吸収できる熱量を仕事に換算したものであり、周囲拘束型鉛ダンパーの減衰性能を評価するための指標となるものである。

表-1 試験体の諸元

鉛プラグ直径、数 (mm×数)	ゴム層厚さ、層数 (mm×層)	内部鋼板厚さ、枚数 (mm×層)	外部鋼板厚さ (mm)	鉛プラグせん断変形部の融解エネルギー E_d (kJ・m)
φ240×2	4×5	3.1×4	28	476.5

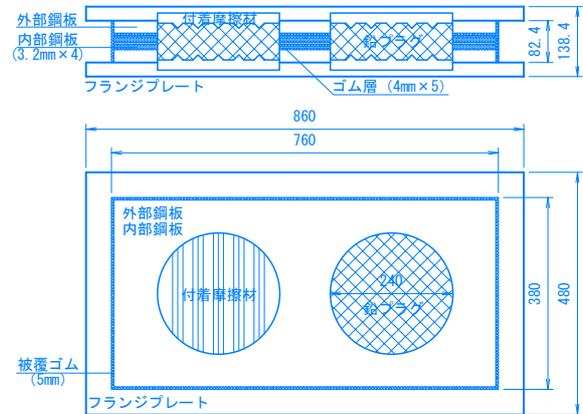


図-2 試験体の概要

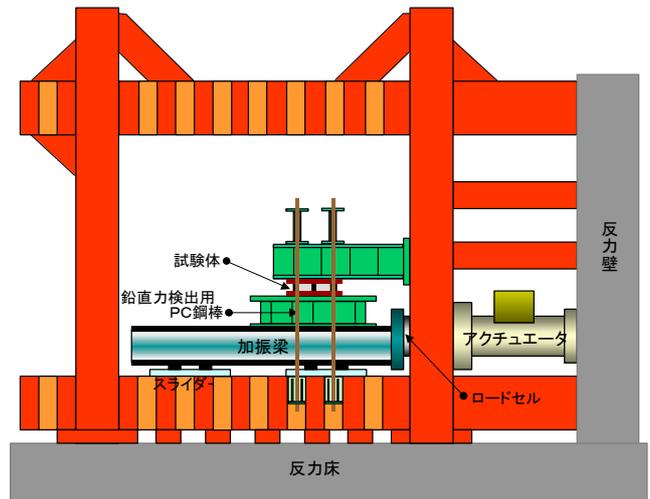


図-3 試験装置の概要

表-2 加振パラメータと気温

試験体名	振動数 (Hz)	振幅 (mm)	サイクル数 (回)	温度 (°C)	振動数 (Hz)	振幅 (mm)	サイクル数 (回)	温度 (°C)
PRL 224-1	0.3	±20	20	12.0	0.3	±40	10	6.0
PRL 224-2	0.3	±10	5	10.5	0.3	±20	5	10.0
			5	22.5			5	23.0
			5	29.0			5	31.0
PRL 224-3	0.01	±10	5	32.0	0.01	±20	5	33.0
			5	29.5			5	30.5
			5	31.5			5	31.5
			5	28.0			5	32.5
			5	29.0			5	31.0
			5	30.5			5	30.5
PRL 224-4	0.3	±10	5	8.0	0.3	±20	5	10.0
		±40	5	13.0				
PRL 224-5	0.3	±20	5	17.0	0.3	±30	5	17.0
		±40	5	17.0		±50	5	17.0
PRL 224-6	0.3	±1	5	28.5	0.3	±3	5	29.0
		±6	5	29.0		±10	5	29.0
		±14	5	30.5		±20	5	31.0

(2) 試験装置と計測項目

図-3に試験装置の概要を示す。加振は最大荷重±3000kN、最大振幅±100mm、最大速度±300mm/sのダイナミックアクチュエータを用いて行い、水平方向の荷重と変形および試験体の鉛直反力を計測した。ここで、水平荷重はアクチュエータ先端に取り付けたロードセルの荷重、水平変形は試験体の上下フランジプレート間の相対変形とし、鉛直反力はあらかじめキャリブレーションを行ったPC鋼棒のひずみ度より算出した。

(3) 加振パラメータ

表-2に各試験体の加振パラメータを示す。加振波形は正弦波とし、加振により試験体温度が上昇した場合には常温(雰囲気温度)に戻るまで時間間隔をおいてから次の加振を行うことにした。なお、表中に示した温度は棒温度計で測定した実験時の雰囲気温度であり、加振開始直後の試験体温度を表すものである。

4. 実験結果

(1) 累積エネルギー吸収量依存性

図-4にPRL224-1試験体の荷重-変形関係を示す。同図より、繰り返し回数が増すにつれて荷重が徐々に低下していることが確認できる。これは、エネルギー吸収により鉛プラグの温度が上昇し、鉛のせん断応力が低下したことによると考えられる。

図-5は、エネルギー吸収に伴う最大荷重の変化を示したものであり、横軸は鉛プラグせん断変形部の融解エネルギー E_0 (表-1参照)で基準化した累積エネルギー吸収量 E 、縦軸は理想荷重の最大値で基準化した各サイクルの最大荷重である。ここで理想荷重の最大値とは、エネルギー吸収による荷重低下を無視した場合の最大荷重の推定値であり、本節では、最大荷重と累積エネルギー吸収量の関係を初期の3サイクルについて指数関数で回帰した結果から、加振振幅が±20mmの場合には1524kN、±40mmの場合には1800kNとした。

図-5より、エネルギー吸収に伴う最大荷重の低下率 C_E は加振振幅にほとんど依存しておらず、同図中に一点鎖線で示した式(1)で与えられることがわかる。

$$C_E = 0.36 + 0.64 \times \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \quad (1)$$

ここで、式(1)の低下率 C_E が最大荷重に限らず全ての荷重に対して適用可能であるとすれば、実験より得られた荷重 Q は、次に示す式(2)によりエネルギー吸収に

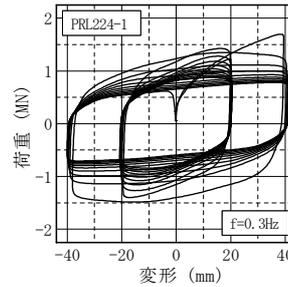


図-4 履歴ループ

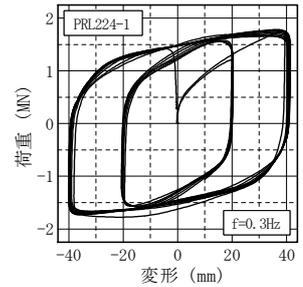


図-6 変換後の履歴ループ

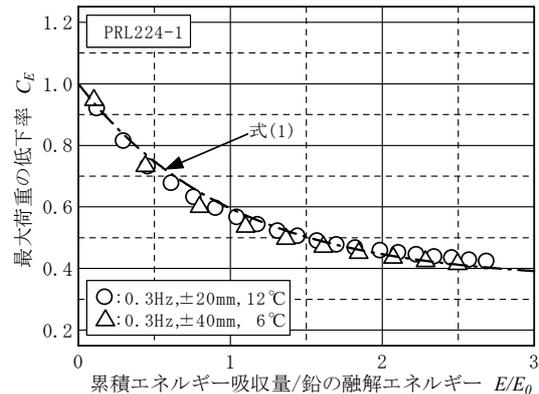


図-5 エネルギー吸収に伴う最大荷重の変化率

よる荷重低下を無視した場合の荷重 Q_{id} (以下、理想荷重)に変換できることになる。

$$Q_{id} = Q / C_E \quad (2)$$

図-6は図-4に示した荷重-変形関係の荷重値を式(2)を用いて変換した履歴ループである。図-4に見られた繰り返しに伴う荷重低下はほとんどなくなっており、式(1)より求まる低下率 C_E は最大荷重に限らず全ての荷重に対して適用可能であると判断できる。

(2) 雰囲気温度および振動数依存性

本節では、荷重(減衰力)の累積エネルギー吸収量依存性が式(1)で与えられるとして、減衰性能の雰囲気温度依存性と振動数依存性について検討する。したがって、本節で扱う荷重は実験値そのものではなく、実験値を式(2)で変換した理想荷重 Q_{id} である。

a) 雰囲気温度依存性

図-7にPRL224-2試験体の荷重-変形関係を実測荷重 Q と理想荷重 Q_{id} について示す。また、表-3に理想荷重の履歴ループより求めた第2・第3サイクルのエネルギー吸収量を示す。これらの結果より、各サイクルの理想荷重、エネルギー吸収量はほぼ同じ値となっており、前節で述べたエネルギー吸収による荷重の低下率 C_E は、雰囲気温度に依存しないことがわかる。

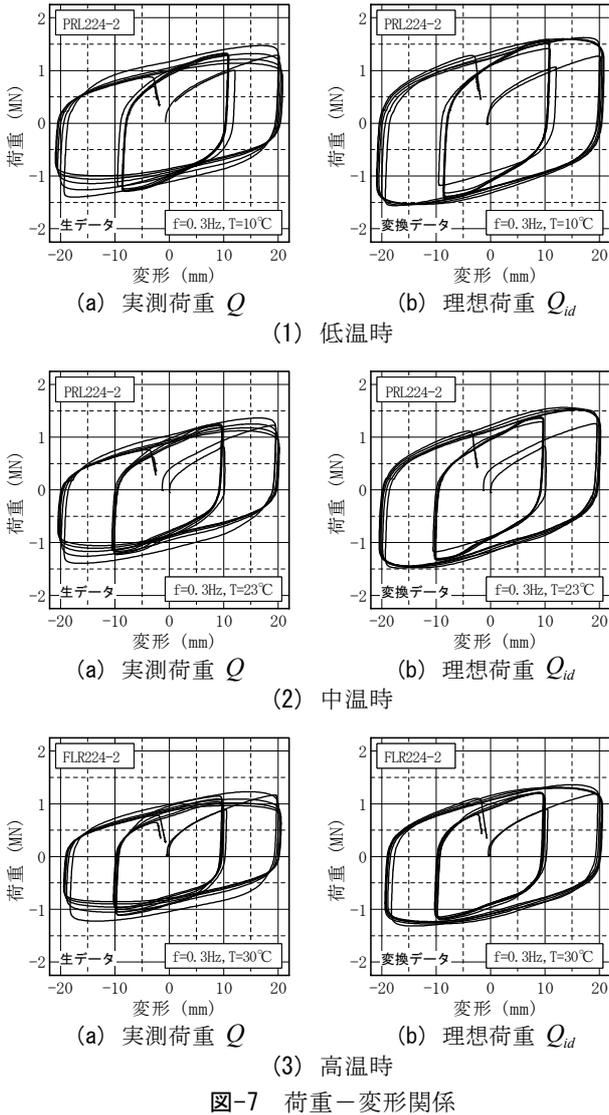


図-7 荷重-変形関係

図-8に理想荷重の履歴ループより求めたエネルギー吸収量の変化率 C_T と雰囲気温度 T の関係を示す。ここで、エネルギー吸収量の変化率 C_T とは、各温度のエネルギー吸収量を表-3に示す実験結果を直線回帰して求めた20℃におけるエネルギー吸収量の推定値(加振振幅±10mm時には36.4kN・m、±20mm時には90.3kN・m)で基準化した無次元量である。

同図より、周囲拘束型鉛ダンパーのエネルギー吸収量は雰囲気温度に依存し、20℃を基準とした場合のエネルギー吸収量の変化率 C_T は、図中に一点鎖線で示した式(3)で与えられることがわかる。

$$C_T = 1.1 - 0.005 \times T \quad (3)$$

式(3)によれば、周囲拘束型鉛ダンパーの使用環境として0℃から40℃程度を想定した場合、減衰性能には2割以上の差が出ることになり、雰囲気温度の違いが本ダンパーの減衰性能に及ぼす影響は無視できないといえる。

表-3 理想荷重より求めたエネルギー吸収量

振動数 (Hz)	振幅 (mm)	雰囲気温度 (°C)	エネルギー吸収量 (kN・m)	
			第2サイクル	第3サイクル
0.3	± 9.9	10.5	37.7	38.7
	± 9.8	22.5	35.8	36.0
	±10.0	29.0	35.6	34.4
0.3	±20.1	10.0	93.9	96.5
	±19.8	23.0	89.1	88.6
	±20.0	31.0	83.5	85.7

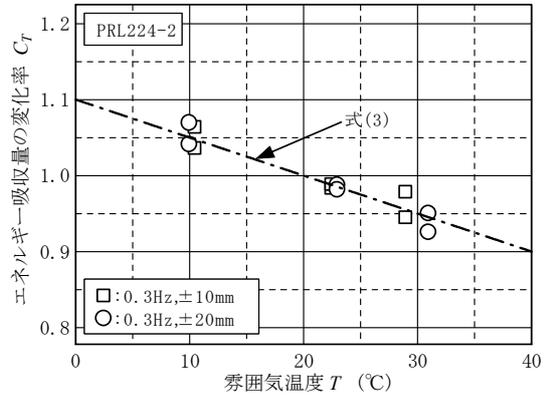


図-8 雰囲気温度によるエネルギー吸収量の変化率

b) 振動数依存性

図-9にPRL224-3試験体の荷重-変形関係を実測荷重 Q と理想荷重 Q_{id} について示す。同図より、0.1Hz以下の振動数では繰り返し変形に伴い理想荷重が増大していく傾向が現れており、前節の式(1)で示したエネルギー吸収による荷重低下率 C_E が低振動数域で過剰な低下率を与えていることがわかる。しかし、

- ①0.2Hz以上の振動数では、各サイクルの理想荷重がほぼ一定に保たれていること
- ②制震ダンパーが設置される建築物の1次固有振動数は、多くの場合0.2Hz以上であること
- ③本項で検討する減衰性能の振動数依存性に、エネルギー吸収による荷重低下率の過不足分を含めることができること

を考慮して、本報では、エネルギー吸収による荷重低下率は振動数にかかわらず式(1)で求められるとする。

なお、低振動数での加振時に繰り返し回数による荷重低下が少なくなる理由としては、鉛プラグの単位時間当たりのエネルギー吸収量が少なくなったために、空気中への放熱や他の部位への熱伝達が効果的に行われ、鉛プラグの温度があまり上昇しなかったことが考えられる。

図-10に理想荷重の履歴ループより求めたエネルギー吸収量の変化率 C_f と振動数 f の関係を示す。ここで、エネルギー吸収量の変化率 C_f とは、各振動数のエネルギー吸収量を0.3Hzの第2・第3サイクルのエネルギー吸収量の平均値(加振振幅±10mm時には34.6kN・m、±20mm時には82.9kN・m)で基準化した無次元量である。

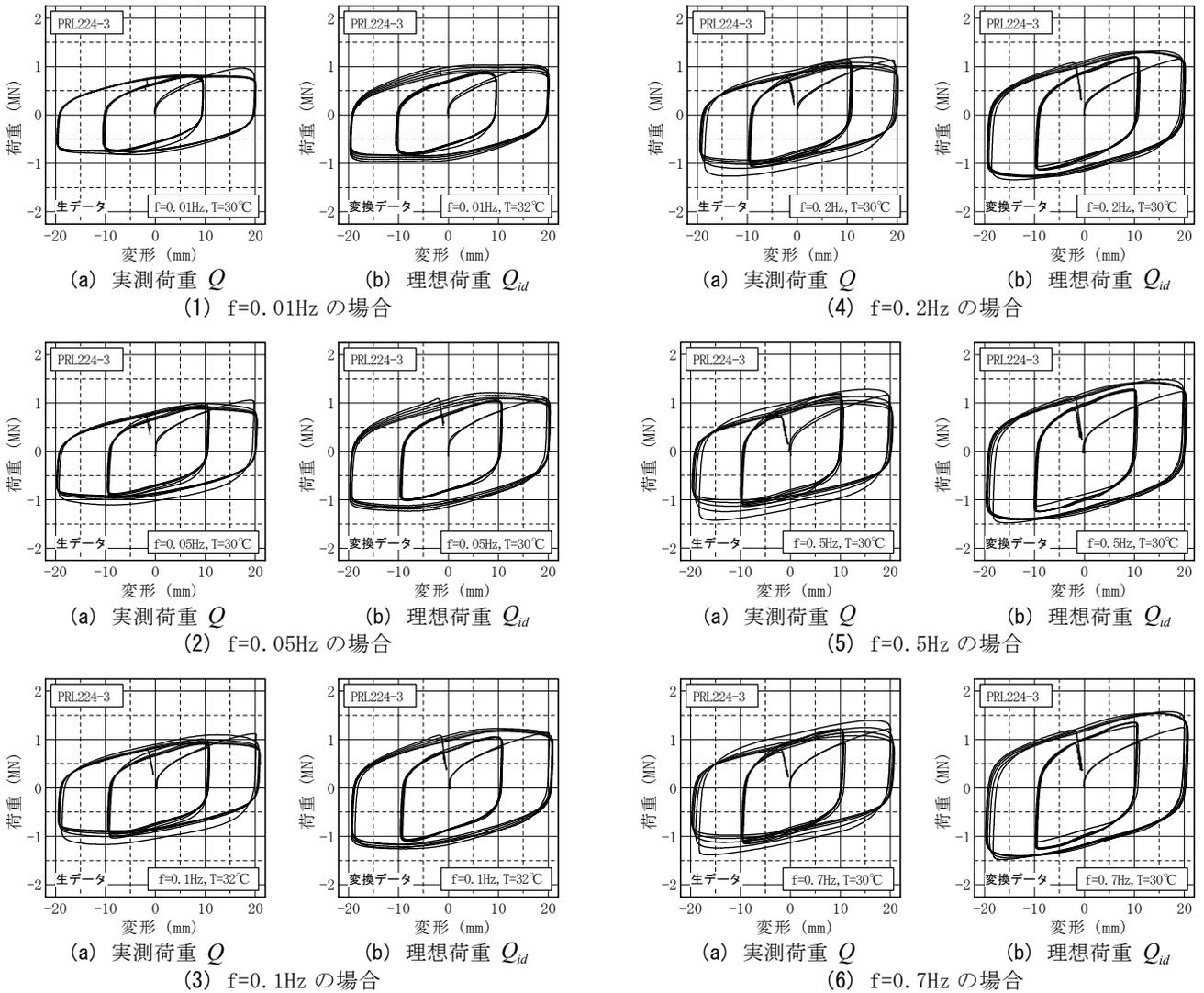


図-9 荷重-変形関係

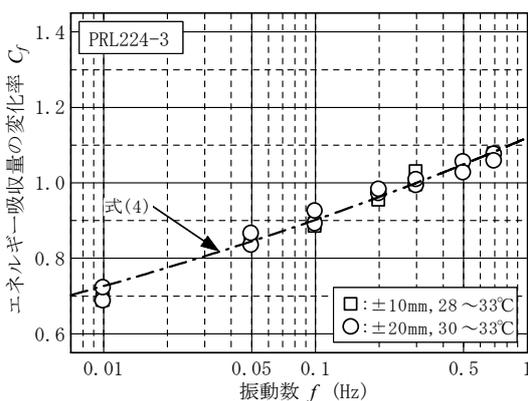


図-10 振動数によるエネルギー吸収量の変化率

図-10より、 0.3Hz を基準とした場合のエネルギー吸収量の変化率 C_f は、図中に一点鎖線で示した式(4)で与えられることがわかる。

$$C_f = 1.12 \times f^{0.094} \quad (4)$$

式(4)によれば、振動数が 0.2Hz から 0.5Hz に変化した場合、エネルギー吸収量は1割程度増大することになり、振動数の違いが本ダンパーの減衰性能に及ぼす影響は無視できないといえる。したがって、本ダンパーを建築物に適用する際には、建築物の1次固有振動数を用いて式(4)に示した変化率 C_f を求め、建築物の振動性状に応じた減衰性能を定めなければならない。

(3) せん断変形依存性

本節では、先に示した式(2)と式(4)を用いてPRL224-4~6試験体の実験結果を 20°C における理想荷重の履歴ループに変換し、理想荷重の復元力モデルに使用する骨格曲線(荷重 Q_{id} とせん断変形 u の関係を表す曲線をさす)を求める。

ここで、復元力モデルには「変形が減少(速度が反転)した場合には即座に荷重が0になり、その後、その位置を原点とした骨格曲線上を進んでいく」という履歴

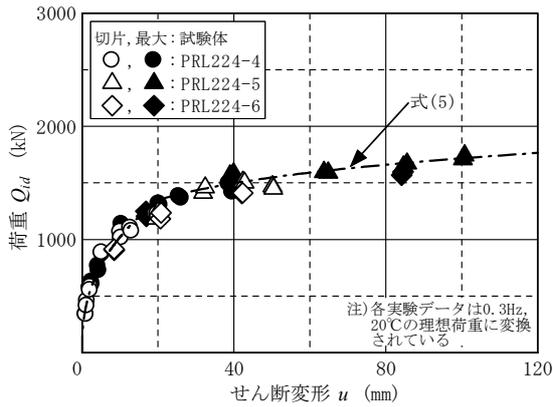


図-11 理想荷重とせん断変形の関係

法則(付録1参照)を採用するため、正弦波加振時の履歴ループより骨格曲線を求めるためには、切片荷重 Q_d (荷重軸との交点における荷重をさす)と片振幅の変形量 δ との関係、最大荷重 Q_{max} と両振幅の変形量 2δ との関係を特定すればよいことになる。

図-11に第2・第3サイクルの履歴ループより求めた荷重とせん断変形の関係を示す。図中、白塗りのプロットは、切片荷重の正負絶対値の平均値 Q_d と片振幅の変形量 δ との関係を、黒塗りのプロットは正負最大荷重の絶対値の平均値 Q_{max} と両振幅の変形量 2δ との関係を示している。

同図より、理想荷重 Q_{id} はせん断変形 u が増すにつれて対数関数的に増加し、その関係は図中に一点鎖線で示した式(5)で与えられることがわかる。

$$\begin{cases} Q_{id} = 407 \times u^{0.40} & ; u \leq 20 \\ Q_{id} = 861 \times u^{0.15} & ; u > 20 \end{cases} \quad (5)$$

ただし、式(5)より得られるのは0.3Hz、20°Cにおける理想荷重の骨格曲線であるため、本ダンパーの復元力特性をモデル化するためには、減衰性能の振動数依存性を表す式(3)、雰囲気温度依存性を表す式(4)、ならびに、累積エネルギー吸収量による荷重低下を表す式(2)を併用しなければならない。

5. まとめ

周囲拘束型鉛ダンパーの動的せん断実験を行い、以下の結論を得た。

- ①累積エネルギー吸収量が増大すると減衰力は低下する傾向にあり、その低下率は式(1)で与えられる。
- ②理想荷重(累積エネルギー吸収量の増大による荷重低下を無視した場合の減衰力)を導入することにより、減衰性能の雰囲気温度依存性・振動数依存性・

- せん断変形依存性を定性的に評価することができる。
- ③雰囲気温度が上昇すると理想荷重のエネルギー吸収量は減少する傾向にあり、20°Cを基準とした場合、その変化率は式(3)で与えられる。
- ④振動数が高くなると理想荷重のエネルギー吸収量は増大する傾向にあり、0.3Hzを基準とした場合、その変化率は式(4)で与えられる。
- ⑤せん断変形が大きくなると減衰力は上昇する傾向にあり、せん断変形と理想荷重の関係は式(5)で与えられる。

今後は、上記の各種依存性を考慮した復元力モデルを構築すると共に、減衰性能のスケール効果について検討する予定である。

参考文献

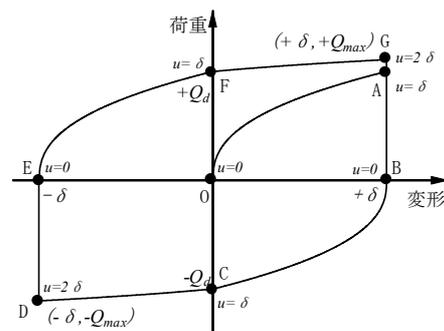
- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，丸善，pp. 240-247，2001.9
- 2) 日本免震構造協会：免震構造入門，オーム社，pp. 175-180，2000.9
- 3) 有馬文昭，高瀬憲克，中南滋樹，鈴木利哉：建築物の地震応答制御設計法への研究—第21編 周囲拘束型鉛ダンパーの特性試験，住友建設技術研究所所報，No. 27，pp. 51-58，2000.9

付録1 理想荷重の復元力モデル

正弦波加振時における荷重-変形関係を模式的に表した付図-1を用いて、4章3節で述べた復元力モデルの履歴法則について説明する。

荷重-変形平面上における基本的な動きは、

- ①0-A間は骨格曲線上を進む
- ②A点で速度反転後、荷重が0になりB点に移動する
- ③原点をB点に移動し、骨格曲線上をD点まで進む
- ④D点で速度反転後、荷重が0になりE点に移動する
- ⑤原点をE点に移動し、骨格曲線上をG点まで進む
- ⑥G点で速度反転後、荷重が0になりB点に移動するとなる。



付図-1 正弦波加振時における復元力モデル