低温環境下における制震ダンパーの動的載荷実験

Dynamic loading test of controlling seismic damper at low temperature environment

学生員 北見工業大学大学院 挾間 藍 (Ai Hasama) 北見工業大学工学部 正員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori) オイレス工業株式会社 正員 藤生重雄 (Shigeo Fujiu) 正 員 オイレス工業株式会社 宮崎 充 (MIturu Miyazaki) 北見工業大学工学部 正 員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki) 北見工業大学工学部 大島俊之 (Toshiyuki Oshima) フェロー

1. はじめに

支承部は現在では主要構造部材のひとつとして多く の機能を有することが期待されているが,それを単一の 支承だけで実現しようとした場合,構造が複雑となり, 既設橋梁の場合は空間的に設置できない場合がある.こ のような場合はエネルギー吸収性能を他の部材に受け持 たせることが有効である¹⁾⁻³⁾.例えば本研究で用いた, シリンダ型制震ダンパーなどが挙げられる.これは,内 部に封入されたオイルや高分子化合物などの物質の流動 抵抗やせん断抵抗力によりエネルギー吸収を行うもので ある.しかし,使用する物質が環境温度により特性が変 化する場合,ダンパーの粘性係数にも温度依存性が生じ て寒冷地などの周辺温度環境が厳しい条件では,エネル ギー吸収性能に影響を与える可能性がある.

そこで,本研究では摩擦履歴型の履歴特性を有するシ リンダ型ダンパーに対して,環境温度を常温から-30 ま で変化させて動的載荷実験を行いその温度依存性を検討 した.

2. 低温環境下における動的載荷実験

2.1 実験供試体

図-1 が本研究で対象としたダンパーであるオイレス工 業製ビンガムストッパー(BM-S)である.本研究では同一 の供試体を2体製作しそれぞれを供試体 A,B とした.

このダンパーは,内部充填材の流動抵抗を利用してお り減衰力は速度依存性を有する.一般に減衰力 F は,ビ ンガム定数 C とべき数αより,F=CV^αで表される^{4),5)}.本 研究で用いたダンパーでは,具体的に式(1)で表すことが できる.

$$F = 166.7V^{0.1} \tag{1}$$

ここで, F は減衰力(kN), V は載荷速度(m/sec)である.
また,このダンパーの非線形特性はバイリニア型で近

似することができ、その関係は以下の式(2)(3)で表される.

$$k_1 = F/2.5(\text{kN/mm})$$
 (2)

$$k_2 = 10^{-5}k_1 \text{ (kN/mm)}$$
 (3)

ここで, k₁:1 次剛性(kN/mm), k₂:2 次剛性(kN/mm). 2.2 実験システム

図-2 に本研究における実験システムの概要を示す.本 実験は低温室内に設置されている油圧アクチュエータを 中心とした低温域材料載荷システムによって実施した. 本システムでは環境温度を35から25程度まで変





図-2 実験システム図

表-1 実験条件(正弦波)

振動数	振幅(mm)					
(Hz)	±10	± 20	± 30	± 40	± 65	
0.1		No.1	No.2	No.3		
0.2		No.4	No.5	No.6		
0.5		No.7	No.8	No.9		
1.0	No.10					
0.25					No.11	

表-2 実験条件(漸増波·地震波)

実験 ケース	入力波形					
	振幅·振動数漸増波形					
No.12	0.75mm	3mm	12mm	30mm		
	0.1Hz →	► 0.25Hz +	► 0.4Hz -	► 0.5Hz		
	2cycle	2cycle	2cycle	6cycle		
No.13	標準地震波 (Type2)					
No.14	十勝沖地震 (十勝河口橋 P5 橋脚)					

平成19年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第64号



化させることが出来る.低温室内には油圧アクチュエー タが鋼製フレーム上部に縦型に設置されており,フレー ム内に設置した供試体に荷重を加えることができる.ア クチュエータの制御は図-2のように外部接続したコンピ ュータによる変位制御で実験を行った.

2.3 実験方法

実験ではダンパーの温度による履歴特性の変化を把 握するために低温室内の温度を 23 ,10 ,0 ,-10 -20 ,-30 と段階的に変化させた.実験開始時には, 供試体温度が室内温度と同程度となり安定していること を確認してから次の実験を行っている.表-1,2 に正弦波 載荷と不規則波形載荷の実験条件を示す.正弦波載荷で は載荷速度による減衰力の変化を確認するために、載荷 振動数、振幅を3段階ずつ変化させたNo.1~9に加えて, 載荷振動数を高くした No.10 と振幅を大きくした No.11 を設定した.正弦波載荷の載荷サイクル数は11サイクル とした.不規則波形については,振幅・振動数漸増波形 を No.12 とし,載荷中のエネルギー吸収量の変化を確認 する.また,地震時においてもエネルギー吸収が適切に 行われることを確認するために 道示の標準地震波 Type-- -2 と 2003 年十勝沖地震の際に十勝河口橋の P5 橋脚 上部で観測された地震波形を用いた

以上の実験について,供試体が環境温度変化と動的載 荷を繰り返し経験した場合の性能変化や供試体の個体差 を確認するために、同条件の載荷実験を供試体Aは2回, 供試体Bは1回行った.

3. 実験結果

3.1 正弦波載荷実験

図-3 に正弦波載荷実験結果の一例として,供試体 B の 各温度で行った表-1 の No.1~11 実験条件での変位-荷重 履歴曲線を示す.どの実験条件においても,履歴曲線は





四角形に近い摩擦履歴型の履歴曲線であることがわかる. 温度変化に対しては,図-3ではいずれの実験条件においても明確な相違は見受けられない.

図-4 に実験条件 No.5 における供試体 A の 1 巡目,2 巡目と供試体 B の環境温度と減衰力の最大値の関係を示 す.図中の破線は温度と減衰力の関係を最小二乗法近似 した直線で,線色はそれぞれの供試体および実験回数に 対応している.まず,供試体 A の減衰力は1 巡目の平均 値に対して2 巡目の平均値の差は0.2%で,本研究で行っ た実験の範囲では同一供試体における繰り返し載荷の影 響はない.また,

供試体 A の 1,2 巡目の平均と供試体 B を比較すると,供 試体 A の減衰力は供試体 B より 3.8%小さい.この差異 は供試体の製作上の過程に起因するものであるが,図-4 からわかるようにその差は小さく,このようなばらつき は問題がないものとなる.また,環境温度が減衰力に与 える影響に関しては,近似直線から若干の温度依存性が あり,環境温度の低下により減衰力がわずかに減少する ことがわかる.3 本の近似直線の係数の平均から求めた 温度による減衰力の変化率は 0.035%/ であり,たとえ ば 23 から-30 では 1.85%の低下になる.この程度の温 度依存性は上述の供試体個体間の差異よりも小さく,本 研究で対象としたダンパーにおいて,供試体の違いや実 験回数,環境温度と減衰力の関係より,温度依存性は無 視して取り扱うことができると考えられる.

また,供試体の載荷実験中の温度変化の一例として, 図-5に供試体Aの1巡目,実験条件No.6で-20 におけ る,実験中と実験後の供試体内部の温度変化を示す.こ のような動的載荷による供試体内部の温度上昇は実験条 件によって異なり,載荷振動数,振幅が大きくなるほど 上昇温度は大きくなる.一方,これらの温度上昇は実験 開始時の環境温度の影響はなく実験条件によってほぼ一 定であった.

次に全実験条件の結果を総合して,図-6 に各温度にお ける最大速度と最大速度時の減衰力を図示した.設計上 の速度-減衰力関係は式(1)で与えられており,図中に赤 実線で示している.図-6より,すべての実験結果で設計 式と同等の減衰力が得られており,上述のように供試体 A,B間や温度による実験結果のばらつきも少ない.

次に全実験条件の履歴吸収エネルギーについて検討 を行う.減衰力の設計式は式(1)で与えられており,履歴 曲線を完全弾塑性バイリニア型で図-7のように仮定する. 設計上は式(3)のように非常に小さな第2次剛性を有する が,ここでは図-7のように,履歴曲線を完全弾塑性バイ リニア型で仮定する.これに基づき,設計式によって描 かれる図-7の履歴曲線の面積と,式(1)における速度依存 関係から,履歴吸収エネルギーEを求めると以下の式(4) のようになる.

$$E = 4nF_0a - (4n - \frac{1}{2})F_0a_0$$

= $4n \cdot C(2\pi)^{\alpha} \cdot f^{\alpha} \cdot a^{\alpha+1} - (4n - \frac{1}{2}) \cdot C(2\pi)^{\alpha} \cdot f^{\alpha} \cdot a^{\alpha} \cdot a_0$ (4)
= $C(2\pi)^{\alpha} \cdot f^{\alpha} \cdot a^{\alpha} \left\{ 4na - (4n - \frac{1}{2})a_0 \right\}$

ここで, *F*₀:減衰力(kN), *a*:振幅(m), *a*₀:塑性化時の 変位 (m), *n*:載荷サイクル数, *C*:ビンガム定数, *α*: べき数, *f*:載荷振動数(Hz)を表す.

各実験条件と全実験結果に対して図-3のような履歴曲 線を求め,履歴面積から履歴吸収エネルギーを求めた結 果が図-8である.なお,実験条件No.7~9とNo.11につ いては,実験時に設定した変位が出力されなかったため, 実際の最大変位に基づいて計算し青色の+印で図示した.

式(4)から a が十分に小さい場合,履歴吸収エネルギー は載荷振幅におおむね比例した関係を有することがわか る.本研究のダンパーにおいては a =0.1 であり,履歴エ ネルギーは振幅の 1.1 乗に比例し,図-8 においても整合 していることが確認できる.また温度や供試体の違いに よる履歴吸収エネルギーのばらつきもほとんどない.

以上より,実験対象のダンパーに正弦波載荷を行った 場合,環境温度による減衰力や履歴吸収エネルギーに与 える影響はほとんど無く,低温環境下においても摩擦履 歴型の履歴特性を保ち,また設計式から算出した値とも



整合していた.さらに供試体 A では同一条件で繰り返し 実験を行ったが有意な性能変化は見られず,供試体 A と 供試体 B の比較でもほぼ同じ結果が得られた.

3.2 不規則波による動的載荷実験

不規則波を用いた載荷実験の結果について,まず図-9

~ 図-11 に供試体 B で得られた各温度における時刻歴応 答波形と変位-荷重の履歴曲線を示す.図-9~図-11 の履 歴曲線からは漸増載荷時や地震波形を入力した場合でも 正弦波載荷時と同様に摩擦履歴型の特性を有し,振幅と 振動数の変化によって履歴面積も増減することがわかる. 温度依存性についても温度に関係なく履歴形状がほぼ一 致し,不規則載荷の場合でもダンパーのエネルギー吸収 性能が低下せず常温時と同等の性能を有している.

図-12 は No.12 ~ No.14 の両供試体で得られた各実験条 件の履歴曲線から環境温度毎の履歴吸収エネルギーを算 出したものである.図-12 を詳細に検討すると,No.12 や No.13 では低温時の履歴吸収エネルギーが高温時より最 大で約 3%大きい.これはアクチュエータによる載荷時 の最大変位が環境温度によって変化してしまったことに よると考えられ,図-9,図-10 の変位時刻歴曲線でも同様 の傾向を表している.これは本研究では変位制御で載荷 を行っており,正弦波載荷実験でも変位は良く制御され ているが,動作が複雑で載荷時間も長い不規則波形を入 力することでアクチュエータの特性に若干の変化が生じ たものと考えられる.なお,供試体Aにおける繰り返し 載荷の影響や供試体A,B間の特性の違いは正弦波載荷と 同様小さくなっている.

以上より,実験対象の BM-S に不規則加振載荷を行った場合でも,温度による影響はほとんど無く,低温環境や動的載荷を繰返し経験しても性能変化は見受けられなかった.

4. まとめ

本研究の実験結果から,以下の結果が得られた.

- (1) 載荷実験時のダンパーの内部温度上昇は実験開始時の環境温度の影響はなく実験条件によってほぼ 一定であった。
- (2) 正弦波載荷における速度 減衰力関係から,本研究 で対象としたダンパーは減衰力の低温に対する温 度依存性はほとんどなく,設計式と同等の減衰力を 有する。
- (3) 履歴吸収エネルギーも環境温度を変化させても、ほとんど変化は見受けられない.また、振幅と履歴吸収エネルギーはおおむね比例関係を持ち、設計式から算出した値と同等のエネルギー吸収がなされている。
- (4) 不規則波形を入力した実験においても,低温への温度変化よる履歴吸収エネルギーの変化は見られず, 低温への温度依存性がないことがわかる.

以上のことから,BM-S は寒冷地における橋梁に適用 する場合でも温度依存性は考慮せずに設計が可能で,地 震動が作用した場合の履歴吸収エネルギーも設計式から 比較的容易に算出することができるため,温度依存性の ある制震装置より設計が簡便で適用性が高いと考えられ る.今後は上記のようなダンパーのエネルギー吸収量の 算定方法を橋梁全体系に適用してその妥当性を検討し, 非線形動的解析などの複雑な解析手法を用いずともダン パーによる制震効果を検討することが可能となるよう検 討する必要がある.



謝辞:本実験を行うにあたり,北見工業大学土木開発工 学科・土木開発工学専攻の学生諸氏の多大なご協力をい ただきました.ここに深く感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 小堀鐸二:制振構造 理論と実際,鹿島出版会,1993.
- 2) 笠井和彦:制震技術の現状と今後の課題,コンクリ ート工学, Vol41, No.5, 2003.
- 3) 日本免震構造協会編:免震構造入門,オーム社,1995.
- 4) オイレス工業株式会社:BM-S 技術資料,2001.
- 5) 二木太郎,横川英彰,宇野裕惠,竹ノ内勇:制震ダ ンパーを用いた系の地震動の違いによる応答差の基 礎的検討,土木学会第62回年次学術講演会講演概要 集,1-461,pp.917-918,2007.