

橋梁耐震補強用ストッパーの 寒冷地における特性の検討

宮森 保紀¹・宮崎 充²・藤生 重雄³
山崎 智之⁴・挾間 藍⁵・大島 俊之⁶

¹ 北見工業大学准教授 工学部 土木開発工学科(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: miyamoya@mail.kitami-it.ac.jp

² オイレス工業(〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000 番地)

Email: m.miyazaki@oiles.co.jp

³ オイレス工業(〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000 番地)

Email: fujiu@oiles.co.jp

⁴ 北見工業大学助教 工学部 土木開発工学科(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: yamazatm@mail.kitami-it.ac.jp

⁵ 北見工業大学大学院 工学研究科 土木開発工学専攻(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: mcv06007@std.kitami-it.ac.jp

⁶ 北見工業大学教授 工学部 土木開発工学科(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: toshima@iea.att.ne.jp

制震構造部材の一つとして制震ダンパーが挙げられる。本研究では、低温下における制震ダンパーのエネルギー吸収性能を検討するため、常温と低温環境下において、正弦波、漸増正弦波および地震波入力による動的载荷実験を行った。実験結果から、変位-荷重関係については摩擦履歴型の履歴曲線が得られ、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確認された。また、低温下でのエネルギー吸収量についても常温とほとんど変化が無いことが確認された。これらのことから本検討で対象とした制震ダンパーは低温下における温度依存性が少なく、-30℃のような温度条件でも温度依存性の影響を受けず効率的なエネルギー吸収が可能なことを確認することができた。

Key Words: *BM-S, controlling seismic damper, dynamic load test,
low temperature environment*

1. はじめに

制震構造部材の一つとして、制震ダンパーが挙げられる。制震ダンパーは地震時にダンパーが摺動する事でエネルギー吸収がなされ、構造物の応答を小さくすることが期待される¹⁾。さらに、制震ダンパーは設計の自由度が高く、既設構造物にも用いる事ができる利点がある。

しかし、この制震ダンパーは環境温度により、特性に影響を受ける事が考えられる。特に寒冷地などの周辺温度環境が厳しい条件では、温度依存性によりエネルギー吸収性能に影響を与える可能性があるため、通常の温度とは別に、低温環境下での検討も必要である。また、ダンパーの履歴特性は通常、正弦波などの周期と振幅、荷重と振動数等が一定の外力を入力し検討される²⁾。しか

し、制震構造部材としての性能を確認するためには、地震波形等の不規則外力に対しても検討しておくことがより望ましいと考えられる。

そこで本検討では低温環境下での正弦波加振による動的载荷実験と、地震波形等を用いた不規則加振による動的载荷実験を行い、制震ダンパーの性能とその有効性を確認する事とした。

2. 供試体

本検討では、オイレス工業製ビンガムストッパー(BM-S)を対象に行った。BM-Sは、特殊充填材の抵抗力を利用した減衰装置で、シリンダー内にある特殊充

填材とピストン・ロッドとで構成される。すなわち、BM-S は地震や強風による構造物の揺れを、特殊充填材が充填されたシリンダーが相対運動をすることにより生じる抵抗力によって振動エネルギーを吸収する装置である。今回の実験で用いた BM-S の写真を図-1 に、一般図を図-2 に示す。実験では、全長 835mm、最大ストローク ±100mm、最大外形寸法 120mm、定格抵抗 150kN (0.5m/sec 時) の供試体を 2 本製作し、それぞれを供試体 A,B と称する。

BM-S は摩擦履歴型のダンパーであり、若干の速度依存性を持っている。その特性は、減衰力 F を速度 $V^{0.1}$ の関数で表すことができ、本実験で用いた供試体については、式(1)で表すことができる。

$$F=166.7 V^{0.1} \quad (1)$$

F : 減衰力(kN) V : 速度(m/sec)

なお、今回の実験では供試体内部に熱電対を設置し、動作時の内部温度を計測できるようにした。その為、最大ストロークを動作させると、熱電対と供試体に干渉が起るため、本実験では、ダンパー移動量を ±80mm 以内とした。

3. 実験方法

本実験は北見工業大学地域共同研究センターに設置されている、低温域材料载荷システムによって実施した。この実験システムは、環境試験室内の温度を -30℃～25℃程度まで変化させることができ、室内には島津製作所製の最大 200kN の動的载荷能力を有する油圧アクチュエータが縦型に設置されている。アクチュエータの最大ストロークは ±100mm であり、同社製の高速制御装置の専用プログラムで、変位制御または荷重制御によりこれを動作させる。

また、この高速制御装置は、データ入出力を外部接続により行うこともできる。そこで、本実験では高速制御装置に National Instruments 社製の DAQ カードを介してコンピュータを接続するとともに、実験室内と供試体に設置した熱電対も、同社製の USB 接続型のデータ入力装置を用いてコンピュータに直接接続した。これによって、地震波等の任意の波形を入力できるようになり、出力データの収集とデータ解析も従来より高速かつ効率的に行えるようになった。外部接続による電圧データの取得と物理量への変換、可視化とデータの保存は汎用数値解析プログラム MATLAB で一括して行った。この実験システムの概要を図-3 に示す。

具体的な実験方法は、外部接続による変位制御によって行った。まずアクチュエータへの入力信号となる変位

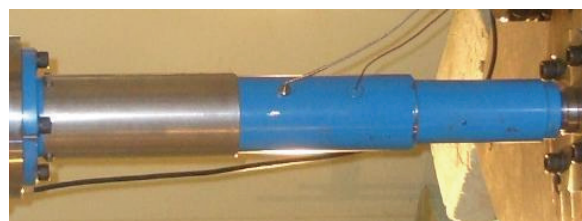


図-1 BM-S

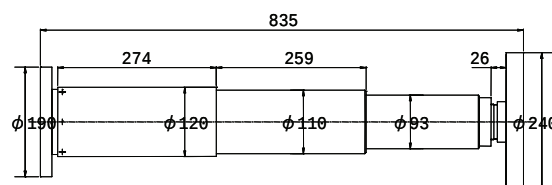


図-2 実験供試体一般図

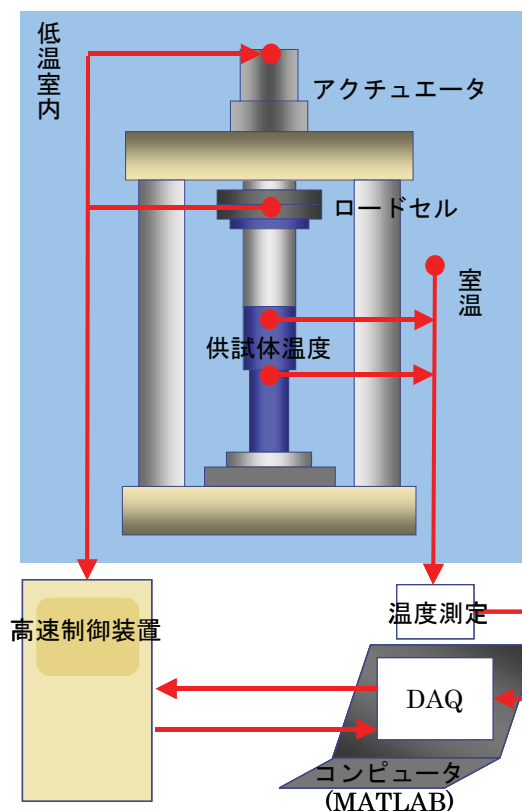


図-3 実験システム

波形を、外部接続のコンピュータ内の MATLAB で電圧に換算する。その後、電圧に換算された変位波形を DAQ カードを介して高速制御装置に入力し、アクチュエータを動作させる。アクチュエータの出力変位電圧とロードセルで得られた荷重電圧は、高速制御装置、DAQ カードを経てコンピュータに取り込まれる。その際、同時に熱電対の電圧もコンピュータに取り込まれる。

4. 実験条件

本実験では、いずれも周辺環境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繰り返し载荷実験を行っている。その際、供試体の温度は载荷実験によって上昇するが、各実験の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いる。また供試体が環境温度変化を繰り返し経験した場合の性能差と供試体の個体差を確認するために、同条件の载荷実験を供試体 A は 2 回、供試体 B は 1 回行った。

(1) 正弦波加振実験

実験条件は表-1 のように設定した。

周辺環境温度による履歴特性の変化を把握するために、载荷速度、振幅を変化させた 11 条件を設定している。これらの設定した各実験について、正弦波加振による载荷実験を行う。各条件について 11 サイクルの加振を、供試体 A,B それぞれに対して行った。

(2) 地震波加振実験

実験条件は表-2 のように設定し、振幅と振動数が段階的に変化する漸増正弦波を 1 条件、地震波 2 条件をそれぞれ実施した。

漸増波形は、振幅を、0.75mm、3mm、12mm、30mm、振動数を、0.1Hz、0.25Hz、0.4Hz、0.5Hz、と段階的に増幅変化させる波形である。また地震波としては、道路橋示方書耐震設計編³⁾における標準地震波 Type II・II・2 と、2003 年十勝沖地震の際に十勝河口橋(P5 橋脚上橋軸方向)で観測された地震波形を用いた。

ここで地震波の入力信号については、実験時のダンパーに対する入力加速度が、観測地震波と同様となるようにアクチュエータの周波数伝達関数⁴⁾を求め、入力波形を調整した。具体的には、まず 0Hz～15Hz までのスイープ波でアクチュエータを加振し、入力電圧と出力電圧を求めた。得られた入力電圧と出力電圧の波形をそれぞれフーリエ変換し、出力波形を入力波形で除して伝達関数を算出した。得られた伝達関数を図-4 に示す。求められた周波数伝達関数から、ダンパーに入力させるべき地震波形のフーリエ変換を周波数伝達関数で除し、これをフーリエ逆変換することでコンピュータからの入力波形を算出した。図-5,6 は地震加速度と変換後の入力波形である。

表-1 実験条件(正弦波)

振動数 (Hz)	振幅(mm)				
	±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
No.12	振幅・振動数漸増波形
	0.75(mm) 3(mm) 12(mm) 30(mm)
	0.1(Hz) ➡ 0.25(Hz) ➡ 0.4(Hz) ➡ 0.5(Hz)
No.13	標準地震波(Type II・II・2)
No.14	十勝沖地震(十勝河口橋 P5 橋脚)

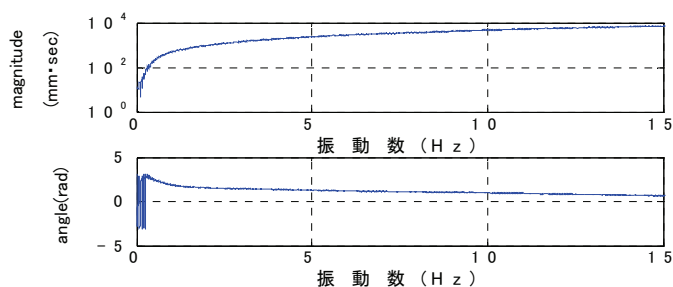


図-4 周波数伝達関数

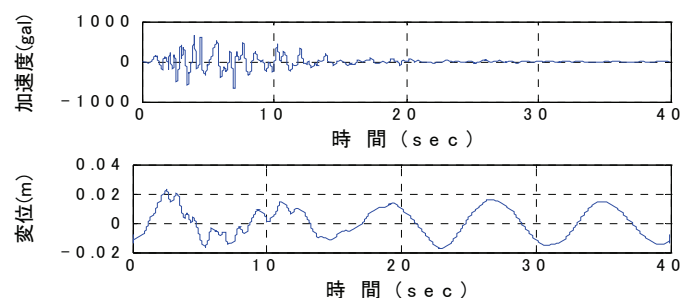


図-5 (標準地震波形)周波数伝達関数による地震波形の変換

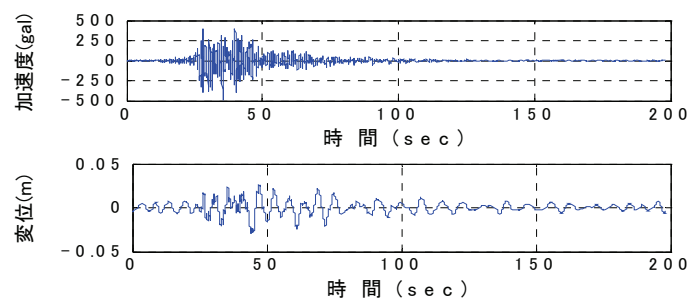


図-6 (十勝沖地震波形)周波数伝達関数による地震波形の変換

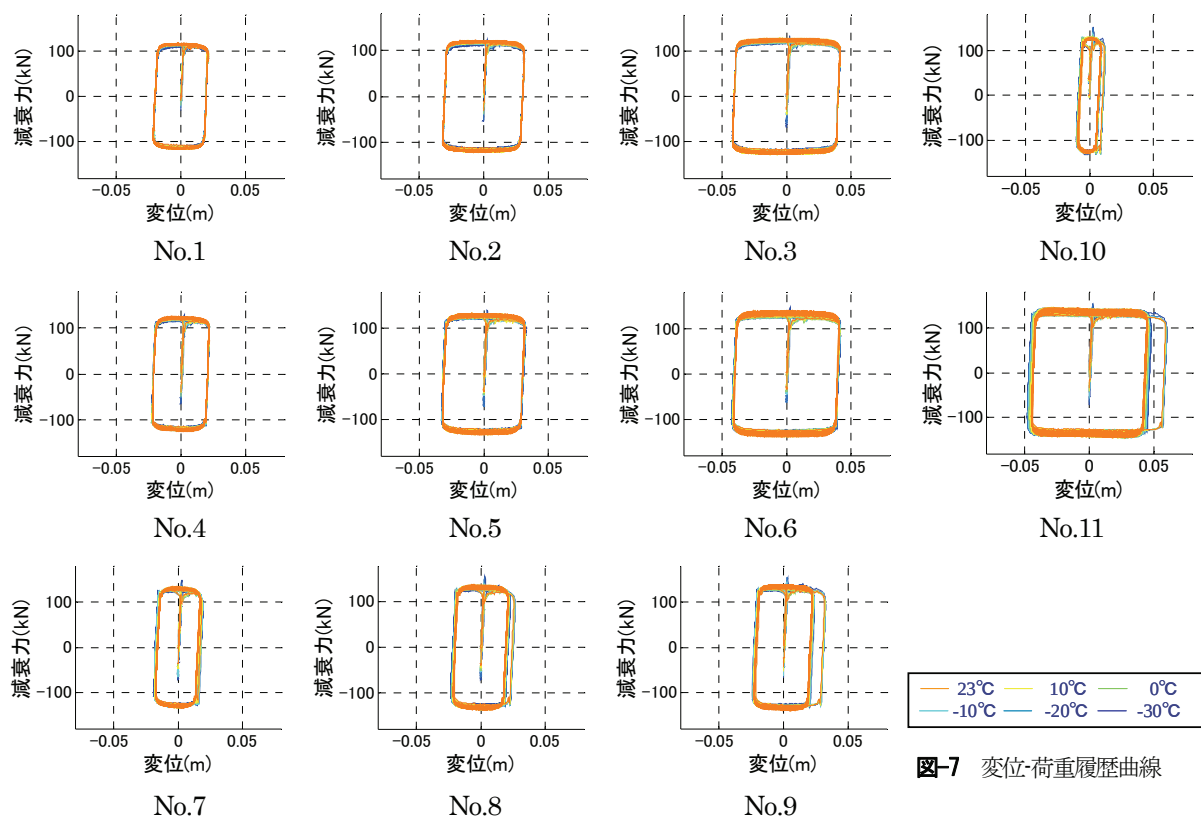


図-7 変位-荷重履歴曲線

5. 実験結果

(1) 正弦波加振実験

図-7に結果の一例として供試体Bで得られた各実験条件の、各温度における変位-荷重履歴曲線を示す。いずれ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。実験条件 No.1～No.6 では、載荷振動数や振幅が増大するにつれて履歴面積も増大することが確認できる。またいずれの実験結果についても、常温と低温での相違はほとんど見受けられない。実験条件 No.7～No.9, No.11 については、油圧アクチュエータの周波数応答特性により変位が減少しているものの、No.1～No.6 同様、常温と低温での違いは見受けられない。

図-8は全実験ケースで得られた実験結果について、各温度のそれぞれの実験結果から速度-減衰力関係を求めたものである。速度は各実験条件における最大速度とし、最大速度時の減衰力を図化した。設計上の速度-減衰力関係は式(1)で与えられており、図中に実線で示している。図-8からすべての実験結果で設計式と同等以上の減衰力が得られており、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。

図-9は例として供試体Bの実験条件No.5の温度-減衰力の関係を示す。温度による減衰力の差は非常に小さく、

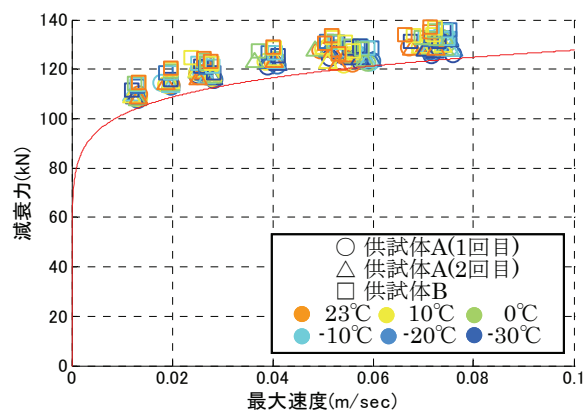


図-8 速度 - 減衰力関係

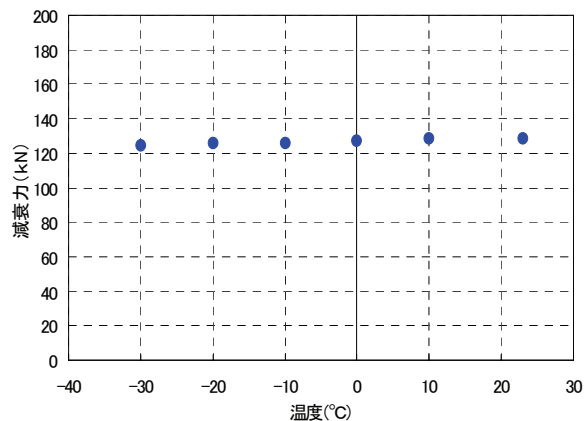


図-9 温度 - 減衰力関係(供試体B、実験条件No.5)

-30℃と 23℃の実験結果を比較すると約3%程度の差であった。他の試験条件についても最大で4.6%と差が小さかった。

図-10 は両供試体で得られた、各温度の試験条件毎の履歴吸収エネルギーを表す。表-1 の実験ケースに対応して、振動数が高く最大振幅が大きいほうが、吸収エネルギーが大きくなっている。供試体や実験回、温度によるばらつきが小さく、耐震デバイスとしての安定性が高いことがわかる。

供試体の温度の一例として図-11,12 に、供試体 A の 1 回目、実験条件 No.6 で-20℃の場合について、実験時と実験後の供試体内部の温度変化を示す。供試体内部の温度は実験開始から 10 秒ほど経過したのち上昇を開始し、実験終了から約 10 分間で約 32 度上昇する。その後緩やかに温度は低下し、約 4 時間で室温と等しくなる。このような温度上昇は、試験条件の温度に関らず、各試験条件によって 10℃～30℃の範囲で一定であり、試験条件の振動数、振幅が大きくなるほど、増加する傾向にある。なおこの間室温は、送風機により一定の変動がある。

以上より、実験対象の BM-S に正弦波加振を行った場合、温度による影響はほとんど無く、低温環境下においても効率的にエネルギーを吸収する結果であった。また、供試体 A のように、低温環境へと変化させる実験を繰り返し経験させた場合でも、性能変化は見られない結果であり、供試体 A と供試体 B のように複数の供試体を比較しても、性能傾向はほぼ一致する結果であった。

(2) 地震波加振実験

図-13～図-15 に結果の一例として、供試体 B で得られた、各温度条件における各実験条件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-13～図-15 に示した履歴曲線のように、履歴は摩擦履歴型の特性をとり、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。これは、入力された振幅により吸収エネルギーも増減することを示している。また、温度に関係なく履歴形状がほぼ一致している。これは低温環境下においても、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することを表している。

正弦波加振と同様に、図-10 の No.12～No.14 は、両供試体で得られた各温度それぞれの履歴吸収エネルギーをあらわしている。これをみると、No.12～14 は両供試体、全温度条件でのばらつきがないことがわかる。

また正弦波加振実験と同様に、供試体 A の 1 回目と 2 回目の実験結果はほぼ一致し、両供試体の温度変化による実験結果のばらつきが見られず同様の傾向を示していることから、低温時の安定性が確認された。

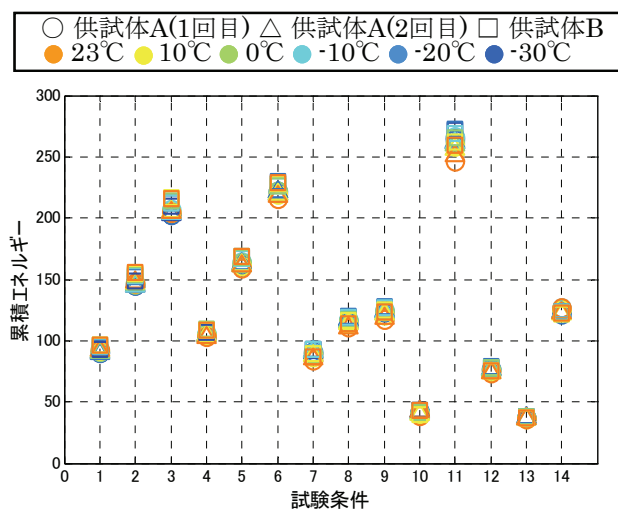


図-10 吸収エネルギー(kJ・m)

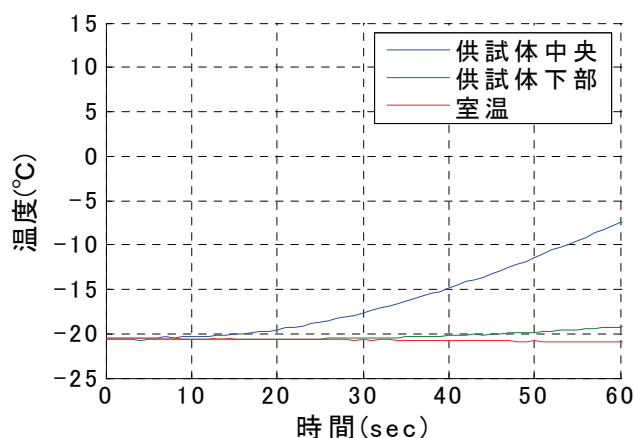


図-11 実験中の温度変化(供試体 A 1 回目 実験条件 No.6 -20℃)

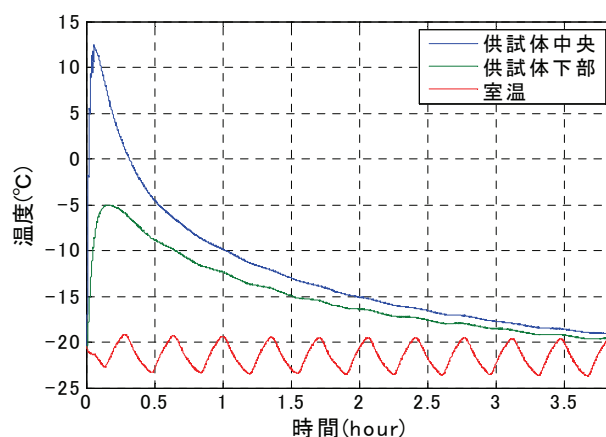


図-12 実験後の温度変化(供試体 A 1 回目 実験条件 No.6 -20℃)

以上より、実験対象の BM-S に不規則加振を行った場合、温度による影響はほとんど無く、低温環境下においても効率的にエネルギーを吸収することがわかった。また低温環境を繰り返し経験しても性能変化は見受けられなかった。

6. まとめ

本検討の実験結果から、以下の結果が得られた。

- (1) 正弦波加振における、速度－減衰力関係は低温への温度変化による減衰力の変化はほとんどなく、設計式と同等以上の減衰力を有する。
- (2) 履歴吸収エネルギーは、環境温度を変化させても、ほとんど違いは見られなかった。
- (3) 不規則波形を入力した実験においても、低温への温度変化による履歴曲線の変化と履歴吸収エネルギーの変化はない。

以上のことから、BM-S は正弦波加振あるいは地震波形等による不規則な加振であっても、低温下における温度依存性がなく、安定したエネルギー吸収を行うことが確認された。したがって、寒冷地における橋梁に適用する場合でも温度依存性は特に考慮する必要がなく、温度依存性のある耐震デバイスと比較して、設計が簡便で適用性が高いと考えられる。

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) 日本免震構造協会編：免震構造入門、オーム社、1995。
- 2) 小堀鐸二：制振構造－理論と実践－、鹿島出版会、1993。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、耐震設計編、丸善、2002。
- 4) 竹下光夫、鷺野翔一：わかりやすい制御、オーム社、2000。

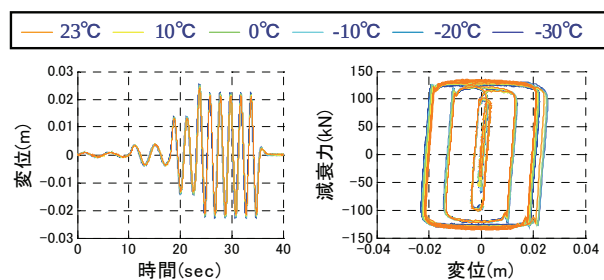


図-13 No.12 漸増波形による変位応答と履歴曲線

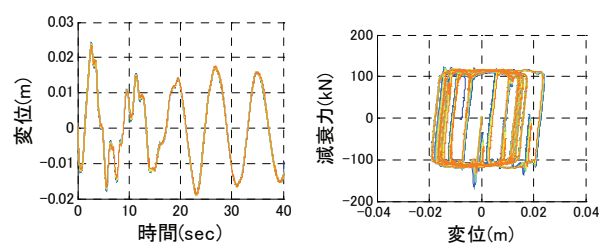


図-14 No.13 標準地震波による変位応答と履歴曲線

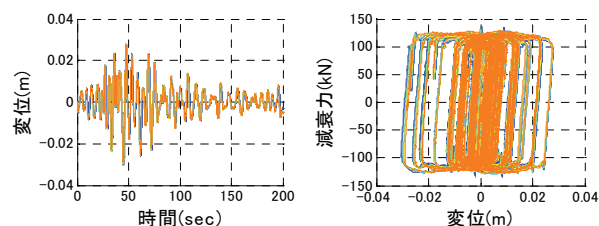


図-15 No.14 十勝沖地震波による変位応答と履歴曲線

(2007. 6. 29 受付)

PERFORMANCE OF CONTROLLING SEISMIC DAMPER FOR BRIDGES AT LOW TEMPERATURE ENVIRONMENT

Yasunori MIYAMORI, Mituru MIYAZAKI, Shigeo FUJIIU,
Tomoyuki YAMAZAKI, Ai HASAMA and Toshiyuki OSHIMA

Controlling seismic damper is a device for improving seismic performance of bridges by energy dissipation. However thermal dependence of damper may be concerned under severe low temperature environment. In this study, sinusoidal dynamic loading tests and seismic loading tests of BM-S damper are performed in low temperature environment. From experimental results, the damper shows the stable friction hysteresis and thermal dependence is quite small for -30 centigrade. Dissipation energy of the damper depends on input amplitude and frequency and it is not affected by low temperature such as -30 centigrade. Therefore the BM-S damper is expected to function as an efficient energy dissipation device under severe low temperature.