

リング摩擦ダンパーのエネルギー吸収能力の検証

Development of a Ring Friction Damper (Energy Absorption Capacity Verification Tests)

阿部 隆 英^{*1} 久保田 雅 春^{*1} 名 取 祥 一^{*1}
Takahide Abe Masaharu Kubota Syouichi Natori
吉 野 明 夫^{*2} 齋 藤 誠^{*3}
Akio Yoshino Makoto Saitoh

【要旨】

2011年東北地方太平洋沖地震を契機として、各種制震デバイスは、長時間地震動への対応が必要とされるようになってきており、ダンパーの潜在能力としてのエネルギー吸収能力の適切な評価が求められている。

摩擦ダンパーのエネルギー吸収能力は、摩擦ダンパーの摩擦面で発生する摩擦熱を伝達させる鉄部の体積による熱吸収可能な容量で決定され、その評価方法として摩擦面の温度上昇の限界値を正確に計測し、摩擦面の温度上昇を適切に評価することが重要となる。

本報告では、実験で摩擦面の温度を計測し、エネルギー量と摩擦面の温度の相関関係を把握することにより、リング摩擦ダンパーが潜在的に有するエネルギー吸収能力を適切に評価する設計式を提案する。設計式は、リング摩擦ダンパーの鉄部の熱容量から設計で使用する摩擦面の温度を評価し、エネルギー吸収能力実験により、設計上の摩擦面の最大温度を決定した。

【キーワード】 摩擦 ダンパー リング 制震 エネルギー吸収能力

1. はじめに

各種制震ダンパーは、2011年東北地方太平洋沖地震で長時間地震動への対応が必要とされるようになってきた。

摩擦ダンパーは、稼働時の摩擦エネルギーを熱に変換することで地震による振動エネルギーを吸収するため、ダンパー稼働時の摩擦面は、急激な温度上昇を伴う。特に長時間地震動では、連続した繰り返しにより摩擦面が自然放熱するまでの時間に膨大なエネルギー量を吸収しなければならず、摩擦面は摩擦熱により高温状態になる。

摩擦ダンパーは、この摩擦面の温度の限界値によりエネルギー吸収能力が決定される。そのため、摩擦熱による温度上昇の評価は非常に重要なものとなる。

これまでの摩擦ダンパーは、摩擦熱によるダンパー各部の温度上昇を求める解析方法¹⁾について述べているものの、長時間地震動に対応した繰り返し実験等において著者の調べる限り行われていない状況であった。

リング摩擦ダンパーは、C型の形状をしたリング（以下C型リングと言う。）をC型リングの内径より大きい直径の円柱状の鋼棒（以下ロッドと言う。）に嵌合することで生じる締め付け力を利用した摩擦ダンパーである。著者らは、これまでにリングの個数を調整することによ

り、設計の自由度が高く、幅広い適用が可能である新しい摩擦ダンパーを開発している。

本報告では、上述の摩擦ダンパーの課題に対し、実験で摩擦面の温度を計測し、ダンパー稼働時に投入されるエネルギー量と摩擦面の温度上昇の相関関係を把握することにより、リング摩擦ダンパーが有するエネルギー吸収能力を確認するとともに、エネルギー吸収能力を適切に評価する手法を提案した。

2. リング摩擦ダンパーの原理と構成

2.1 リング摩擦ダンパーの原理

リング摩擦ダンパーは、C型リングとロッドを嵌合し、C型リングとロッドが滑ることにより摩擦が生じる。摩擦エネルギーは、摩擦荷重と滑り距離から得られ、摩擦熱に変換し、C型リングやロッド等が吸収する。

リング摩擦ダンパーの摩擦荷重は、C型リングの締め付けによるロッドへの締め付け力と摩擦係数を乗じることで求めることができる。C型リングの締め付け力は、C型リングの内径よりロッドの外径を大きくすることで生じる。また、摩擦係数を安定させるためにロッドとC型リングの間には、潤滑剤を塗布し、摩擦係数を0.05~0.08

1. 建設事業本部 トグル事業部 トグル企画グループ 2. (株)E&CS 3. 日本発条(株)

に設定している。

C型リング1個当たりの摩擦荷重(f)は、式(1)で表わされ、C型リングを複数個重ねた単体モデルの摩擦荷重(F'_s)は、C型リング数に比例し、式(2)で表わされる。

また、単体モデルを複数本組み合わせた複合ダンパーの摩擦荷重(F'_c)は、C型リングを同一個数重ねた単体モデル数に比例し、式(3)で表わされる。

$$f = 8\pi \cdot \mu \cdot E \cdot I \cdot \frac{\Delta D}{D^3} \quad (1)$$

$$F'_s = f \cdot n \quad (2)$$

$$F'_c = F'_s \cdot N \quad (3)$$

ただし、

f	: C型リング1個当たりの設計摩擦荷重	(N)
F'_s	: 単体モデル1本当たりの設計摩擦荷重	(N)
F'_c	: 複合ダンパーの設計摩擦荷重	(N)
E	: C型リングのヤング係数	(N/mm ²)
I	: C型リングの断面二次モーメント	(mm ⁴)
μ	: 摩擦係数	
n	: C型リング数	
N	: 単体モデル数	
ΔD	: 締め代	(mm)
D'	: 締めつけ時のC型リングの中心径	(mm)

2.2 部材の構成

リング摩擦ダンパーは、C型リングとロッドを嵌合し、摩擦を生じさせる機構を1つの単位とし、それを組み立てた単体モデルを基本構成部材と位置付ける。

ここでは、単体モデルを基本とする2タイプのダンパーを定義する。単体モデルの両端にクレビスを取り付けたダンパーを単体ダンパーと呼び、単体モデルを複数本組み合わせ、両端にクレビスを取り付けたダンパーを複合ダンパーと呼ぶ。単体モデルの各部材の名称および写真を図-1および写真-1に、複合ダンパーの各部材の名称および写真を図-2および写真-2に示す。

2.3 リング摩擦ダンパーの特徴

リング摩擦ダンパーは、配置するC型リング個数により摩擦荷重を決定するため、摩擦荷重を自由に設計できる設計自由度の高いダンパーであると共に、製作誤差を含め摩擦荷重の許容誤差±5%の品質管理が可能である。

また、リング摩擦ダンパーは、摩擦係数を押えることにより、通常摩擦ダンパーで見られる静摩擦荷重から動摩擦荷重への切り替え時の荷重の飛び跳ね(いわゆる荷重の角)²⁾が無く、多くの摩擦ダンパーに見られるスティックスリップも大幅に低減しているという特徴がある。

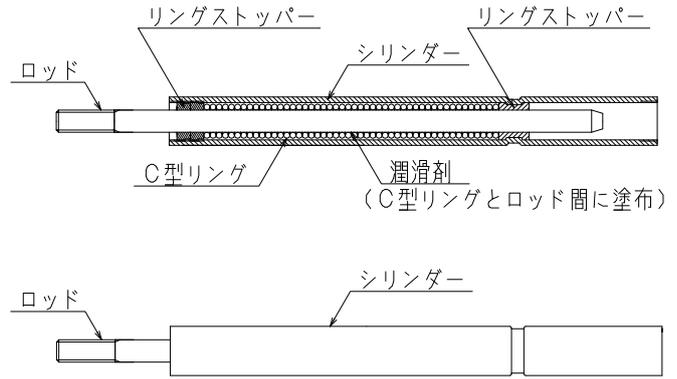


図-1 単体モデルの各部材の名称

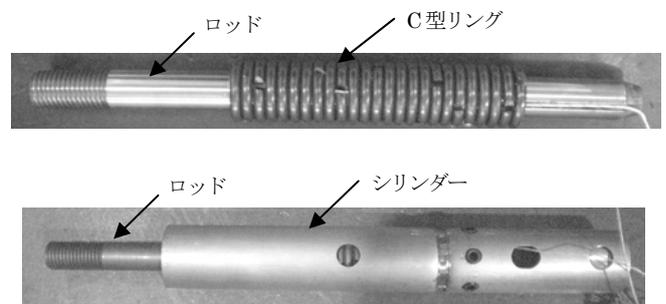


写真-1 単体モデルの各部材の写真

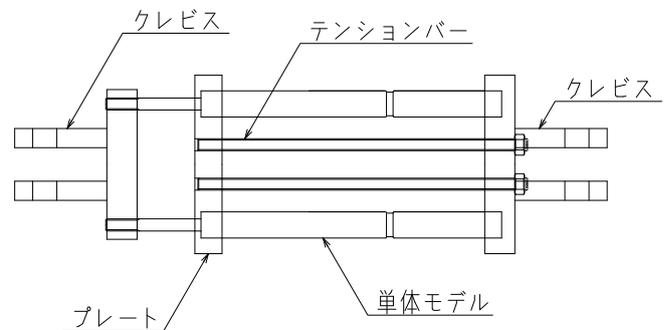


図-2 複合ダンパーの各部材の名称

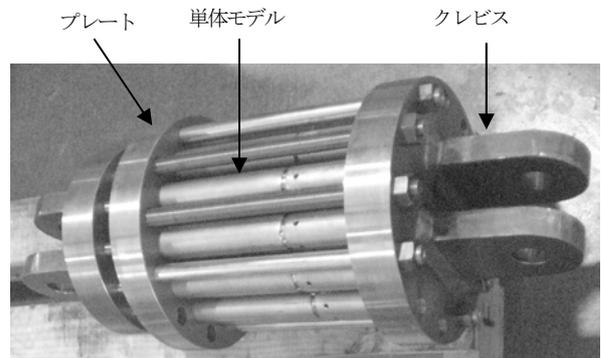


写真-2 複合ダンパーの各部材の写真

3. エネルギー吸収能力実験

3.1 試験体概要

エネルギー吸収能力実験では、エネルギー量を得るために摩擦荷重と滑り距離を計測し、エネルギー量と摩擦熱の相関関係を把握するために摩擦面の温度を計測した。これらのデータからリング摩擦ダンパーが有するエネルギー吸収能力を検証すると共に、エネルギー吸収能力を評価する設計式を提案する。

試験体は、ロッドの表面処理の方法、潤滑剤およびC型リング数の組み合わせにより、試験体A、試験体Bの2体とした。試験体Aの潤滑剤は、リチウム石けん基グリースを用い、試験体Bの潤滑剤は、試験体Aより耐熱性に優れたフッ素オイルグリースを用いた。

また、試験体Bのロッドの表面処理は、C型リングと同様の乾性被膜潤滑剤を施し、試験体Aの硬質クロムメッキに比べ耐摩耗性を考慮した。

表-1に各試験体の仕様を示す。

表-1 試験体の仕様

試験体	C型リング				
	材質	線材径	内径	積層数量	表面処理
試験体A	SWOSC-V	φ5.5	φ19.2	20	二硫化モリブデン配合乾性被膜潤滑剤
試験体B				25	

試験体	ロッド				潤滑剤
	材質	外径	熱処理	表面処理	
試験体A	S45C	20	高周波焼入	硬質クロムメッキ	リチウム石けん基グリース
試験体B				二硫化モリブデン、グラファイト配合乾性被膜潤滑剤	フッ素オイルグリース

3.2 変位計測および温度計測

ダンパーの変位計測は、写真-4に示すように、ダンパー外筒のシリンダーに治具で変位計を2体固定し、ロッドの動きのみを計測した。温度計測は、ロッドに3mmの溝を掘り、熱電対を配置し、ダンパーのロッド外面とC型リング内面の実際に摺動する摩擦面を計測して、正確な摩擦熱を計測することで、エネルギーを評価した。写真-3に熱電対配置状況を、図-3に熱電対配置図を示す。

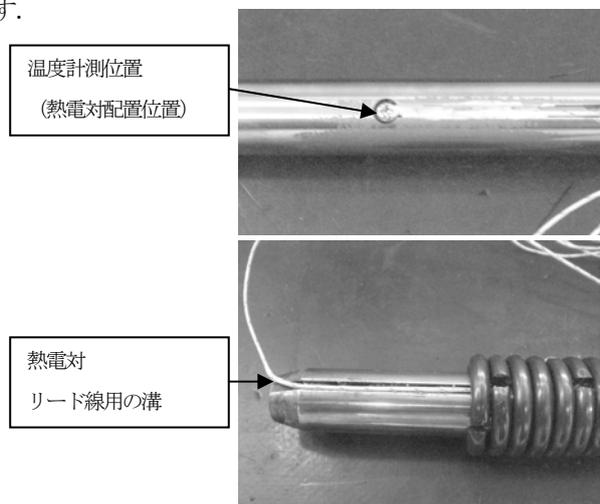


写真-3 熱電対配置状況

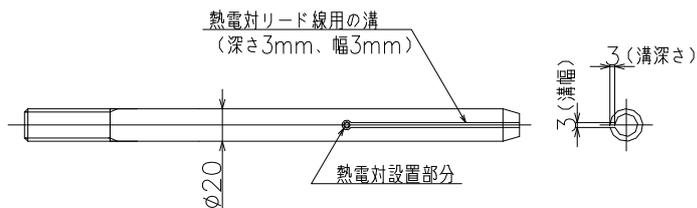


図-3 熱電対配置計画図

3.3 加力

ダンパーのエネルギー吸収能力実験は、周波数 1.0Hz の正弦波で片振幅 10mm とし、同じ試験体で 2 回繰り返すこととした。継続時間は、摩擦面（付近）のロッドの温度が 300°C を超えるまでとし、摩擦面の温度が自然冷却により 20~25°C の範囲まで下がった後、再度エネルギー吸収能力実験を行った。

また、ダンパーの摩擦力-変位などの基本性能を確認するための性能確認実験は、周波数 0.05Hz、片振幅 10mm において、各 5 サイクルを行った。

性能確認試験を行うタイミングは、エネルギー吸収能力実験開始前、1回目終了後、2回目終了後の合計3回行い、全振幅領域における摩擦荷重の変動を確認した。

なお、性能確認実験においても摩擦面の温度は、実験により上昇した温度が自然冷却により 20~25°C の範囲までの低下を待ち、開始した。表-2に各実験概要を示し、実験手順を図-4に、実験状況を写真-4に示す。

表-2 各実験概要

	エネルギー吸収能力実験	性能確認実験
実験回数	2回	3回
载荷周波数	1.0Hz (正弦波)	0.05Hz (正弦波)
片振幅	10mm	10mm
継続時間(回数)	摩擦面 300°C を超えるまで	5 サイクル
実験開始温度	摩擦面 20~25°C	

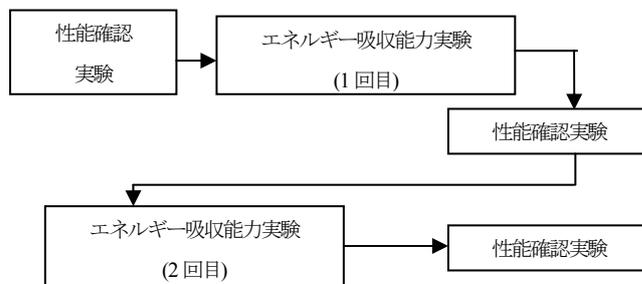


図-4 実験手順

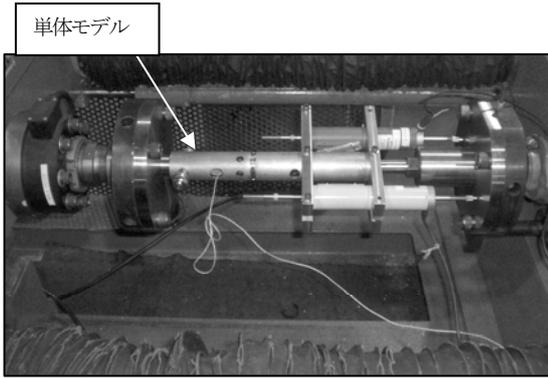


写真-4 実験状況

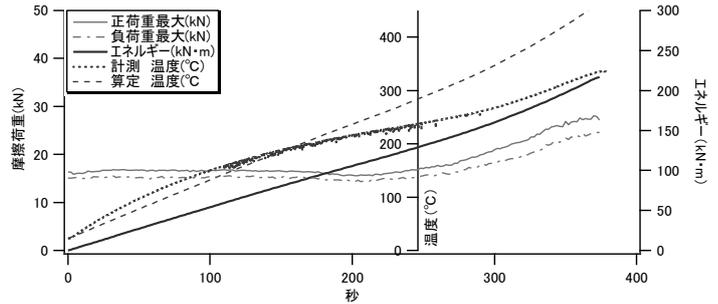


図-5 試験体A エネルギー吸収能力実験1回目

4. 実験結果

図-5, 図-6に試験体Aのエネルギー吸収能力実験結果を, 図-7, 図-8に試験体Bのエネルギー吸収能力実験結果を300°Cに達するまでについて示す。

なお, 図-5~図-8に示す算定温度は, 後述する「5. 摩擦面の温度予測検証およびエネルギー吸収能力の検証」の章で提案する式(4)により算定した値である。

エネルギー吸収能力実験は, 1回目の実験として計測温度が300°Cを超えるまで実験を行い, 1回目終了後に20~25°Cまで自然冷却し, 2回目も計測温度が300°Cを超えるまで実験を行った。

試験体Aのエネルギー吸収能力実験1回目では, 計測温度260°Cまで摩擦荷重に増減の変動が見られ, 260°Cを超えてからは増加の傾向が見られた。また, 計測温度による摩擦荷重の変動は, 自然冷却後のエネルギー吸収能力実験2回目においても1回目と同様な傾向を示した。

試験体Bのエネルギー吸収能力実験1回目では, 計測温度が300°Cまで摩擦荷重は直線的に減少したが, 自然冷却後のエネルギー吸収能力実験2回目の実験では, 300°Cまでエネルギー吸収能力試験前の性能確認実験における平均摩擦荷重18.7kNに対し±10%程度の範囲で推移した。

図-9~図-11に試験体A, Bの性能確認実験の荷重変位曲線を示し, 各性能確認実験の平均摩擦荷重の比較を表-3に示す。

試験体Aの性能確認実験では, エネルギー吸収能力実験前の性能確認実験の平均摩擦荷重20.1kNに対し, 1回目(エネルギー吸収能力実験1回目終了時)は18.7kN, 2回目(エネルギー吸収能力実験2回目終了時)は20.1kNとなった。

試験体Bの性能確認実験では, エネルギー吸収能力実験前の性能確認実験の平均摩擦荷重18.7kNに対し, 1回目が20.0kN, 2回目が19.7kNとなった。

よって性能確認実験における平均摩擦荷重は, 試験体Aは初期値に対して最大-7.0%, 試験体Bは最大で+7.0%となる結果を得た。

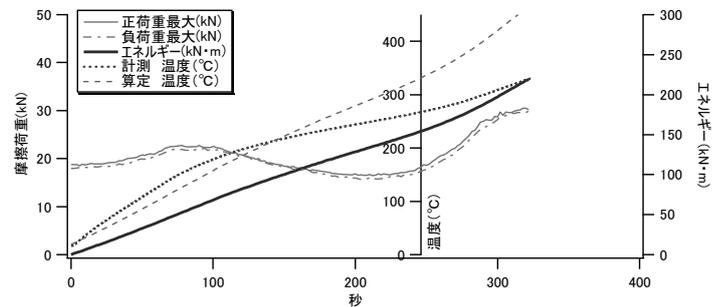


図-6 試験体A エネルギー吸収能力実験2回目

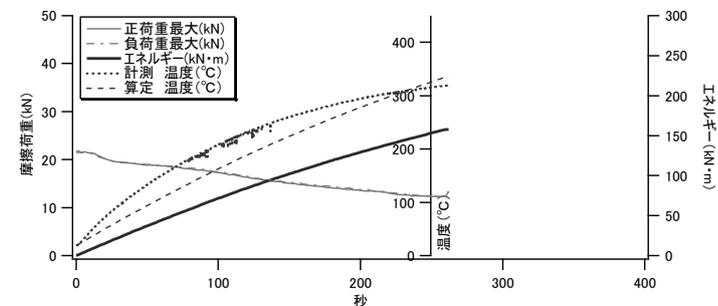


図-7 試験体B エネルギー吸収能力実験1回目

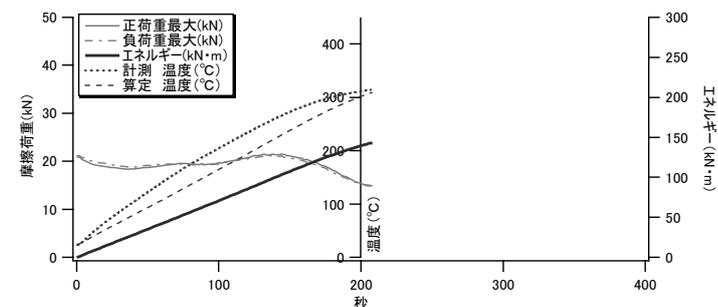
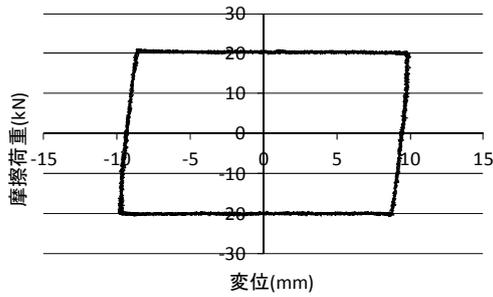
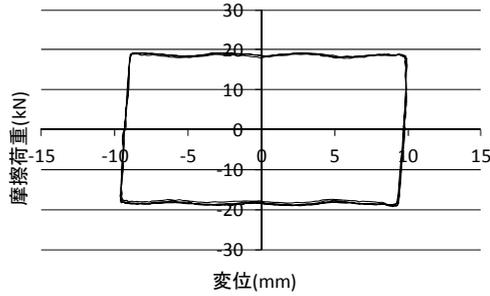


図-8 試験体B エネルギー吸収能力実験2回目

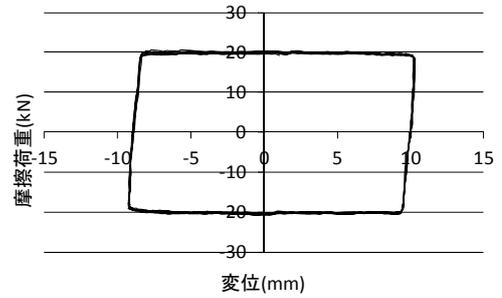


a) 試験体 A 平均摩擦荷重 : 20.1kN

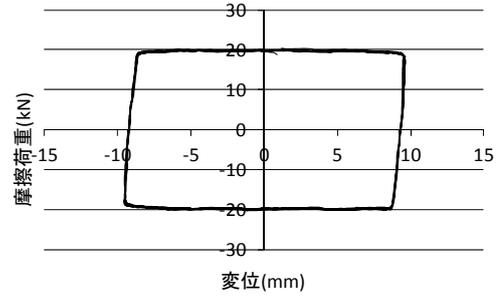


b) 試験体 B 平均摩擦荷重 : 18.7kN

図-9 エネルギー吸収実験前 性能確認実験 荷重変位曲線



a) 試験体 A 平均摩擦荷重 : 20.1kN

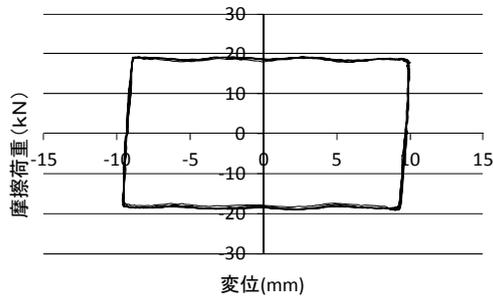


b) 試験体 B 平均摩擦荷重 : 19.7kN

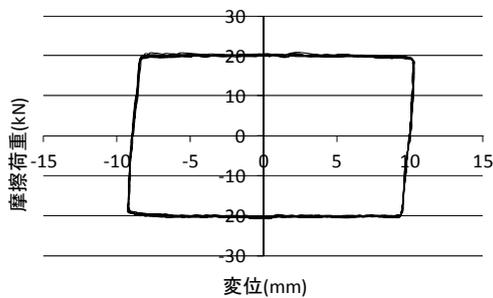
図-11 エネルギー吸収実験2回目終了時 性能確認実験 荷重変位曲線

表-3 各性能確認実験の平均摩擦荷重の比較

	試験体 A		試験体 B	
	(kN)	(%)	(kN)	(%)
初期値	20.1	-	18.7	-
1 回目	18.7	-7.0	20.0	+7.0
2 回目	20.1	0.0	19.7	+5.3



a) 試験体 A 平均摩擦荷重 : 18.7kN



b) 試験体 B 平均摩擦荷重 : 20.0kN

図-10 エネルギー吸収実験1回目終了時 性能確認実験 荷重変位曲線

5. 摩擦面の温度予測検証およびエネルギー吸収能力の検証

摩擦面の温度上昇の計算は、式(4)に示すように C 型リングとロッドを合計した鉄部の体積に対する熱容量を用いて算定する。なお、式(5)に示すリング摩擦ダンパーが設計上使用できる最大のエネルギー吸収量は、ロッドやC型リングが有する熱容量とエネルギー吸収能力試験の結果より安定した摩擦荷重を得られる最大温度(以下摩擦面の設計最大温度という。)で算定する。設計最大温度は、ロッド表面の急激な摩擦係数の変化による摩擦荷重のばらつきや変動を考慮した上で安全側の評価として、原則的に設計で使用する摩擦面の温度の上限として試験体 A で 250°C以下、試験体 B で 300°C以下とした。

なお、放熱の影響については、ダンパーの性能において安全側の評価となるので熱量の計算には考慮していない。

$$T = \frac{E_s}{C} + T_e \quad (4)$$

$$E_{\max} = C(T_{\max} - T_e) \quad (5)$$

ただし、

T	: 摩擦面の算定温度	(°C)
T_e	: 環境温度	(°C)
T_{\max}	: 摩擦面の設計最大温度	(°C)
C	: C型リングとロッドの熱容量	(J/K)
E_s	: 消費エネルギー量	(kN・m)
E_{\max}	: 最大吸収エネルギー量	(kN・m)

試験体 A において、式(4)より求めた算定温度は、図-5、図-6に示す計測温度と 150 秒までで最大約 20%の差がみられた。また、試験体 B においては、図-7、図-8に示す計測温度と式(4)より求めた算定温度で最大約 30%の差がみられた。

算定温度と実験値の計測温度は、試験体 A で 250°C程度、試験体 B で 300°C程度まで比較的良く対応しており、今回提案する熱エネルギー容量の設計式は、リング摩擦ダンパーの性能を評価できたと言える。

これらより、リング摩擦ダンパーのエネルギー吸収能力は、熱エネルギーに変換できる量であり、ロッドとC型リング等の鉄部の体積による評価が妥当であると考えられる。

また、複合ダンパーの最大吸収エネルギー量の設計は、C型リングの全数を変えずに単体モデル数を多くすることで、摩擦荷重を変えずに最大吸収エネルギー量を増加させることが可能である。

6. 結論

リング摩擦ダンパーのエネルギー吸収能力実験で得られた知見を以下に示す。

- 1) エネルギー吸収能力は、摩擦面の温度を鉄部の体積に対する熱容量を用いた設計式により評価できる。
- 2) エネルギー吸収能力実験後に行った性能確認実験では、初期値に対してエネルギー吸収能力実験後の摩擦荷重における性能比較では±7.0%以内となる結果を得た。

【参考文献】

- 1) 大西博之, 北嶋圭二, 上田英明, 横山博至, 田中稔, 中西三和, 安達洋: ダンパーを用いた既存 RC 建造物の耐震補強法に関する研究(その 15 摩擦ダンパーの温度解析), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造IV, pp.169~170, 1998. 7.
- 2) (社)日本免震構造協会: パッシブ制震構造設計・施工マニュアル 第2版, 2007. 7.

Summary In the wake of the 2011 off the Pacific Coast of *Tohoku* Earthquake, various types of dampers are required to cope with long-term seismic motions. Appropriately evaluating the energy absorption capacity is required as a potential feature of dampers.

The energy absorption capacity of friction dampers is determined by the limit of temperature rise on the friction surface. Evaluating temperature on the friction surface is therefore important.

A method was examined for evaluating potential energy absorption capacity of ring friction dampers by measuring temperature on the friction surface in testing and identifying the correlation between the amount of energy and temperature on the friction surface. As a result, the rise of temperature on the friction surface could be evaluated by a formula that used the ratio of thermal capacity to the combined volume of steel section composed of ring and rod.

Key Words : Friction , Damper , Ring , Controlled structures , Energy absorption capacity