

論文 既存 RC 造建物の制震補強用摩擦ダンパーに関する研究

大西 博之^{*1}・北嶋 圭二^{*2}・中西 三和^{*3}・安達 洋^{*4}

要旨：本研究は、変形性能に乏しい既存 RC 造建物の制震補強用摩擦ダンパーの性能に関する研究である。まず、ダンパーの単体の性能を調べる試験（単体性能試験）を行い、地震時に要求される性能を満足していることを確認した。次に、試験結果から得られた摩擦ダンパーの稼働時における以下の諸現象が、数値解析によって説明可能であることを示した。ダイスとロッドの形状とダンパーの初期摩擦荷重の関係および、繰返し加振時に発生する摩擦熱により上昇するダンパー温度、さらには、この温度上昇に伴う摩擦荷重の上昇を解析から求め、試験結果を説明した。

キーワード：耐震補強、応答制御、摩擦ダンパー、摩擦熱、性能試験

1. はじめに

兵庫県南部地震の甚大な被害の教訓より、現在、学校建物や公共建物を中心に耐震診断・耐震補強が順次進められている。研究・開発の分野においても、建物を継続使用しながら補強工事が行える制震補強工法等の新しい補強法に関心が向けられ、実施事例も報告されるようになってきている¹⁾。地震による建物の揺れを制震部材(以下、ダンパー)によって抑えようという制震補強法には、履歴減衰型、摩擦減衰型、粘性減衰型のダンパーが用いられている²⁾。

筆者らは、せん断破壊部材の脆性的な破壊を特徴とする RC 造建物の制震補強用ダンパーとして、僅かな変形からエネルギーを吸収し始める摩擦ダンパーを開発し、応答解析や仮動的実験などによりその補強効果を確認してきた^{2),3)}。

本研究は、制震補強用摩擦ダンパーの性能をより詳細に把握することを目的としたものであり、摩擦ダンパーを構成するダイスとロッドの形状と摩擦荷重の関係や、繰返し加振時に発生する摩擦熱の影響について、実験的および解析的に検討したものである。

本論文では、外圧を受ける円柱と内圧を受ける円筒の弾性理論解を用いて、摩擦ダンパーを構成するロッドとダイスの形状から、初期摩擦荷重が推定可能であることを述べる。また、繰返し加振時に発生する摩擦熱によるダンパーの温度上昇を数値解析的に求め、さらに、この温度上昇による摩擦荷重の上昇を数値解析的に求めることによりダンパーの熱的特性を把握する。

2. 摩擦ダンパーの構成

摩擦ダンパーの構成を図-1に示す。ダイスとロッドにより構成される摩擦ダンパーが、地震時にある一定の摩擦荷重を保持しながら変位することにより、地震エネルギーを摩擦熱に変換し、地震終了時までのエネルギーを吸収する。ダンパーの構成要素の材質は、ロッドが銅合金、ダイスが合金工具鋼鋼材、内外筒が一般構造用炭素鋼鋼管である。ダイスとロッドの摩擦面には、より安定した摩擦荷重を得るために、被膜潤滑剤を塗布している。

本論文で検討するダンパーは、摩擦荷重および面圧と摩擦係数の関係等の基本データを取得

*1	日本大学大学院	理工学研究科海洋建築工学専攻	(正会員)
*2	(株)青木建設	研究所建築研究室主任研究員	工博 (正会員)
*3	日本大学助教授	理工学部海洋建築工学科	工博 (正会員)
*4	日本大学教授	理工学部海洋建築工学科	工博 (正会員)

した摩擦荷重 98kN のダンパーと、そのデータに基づき、数値解析によりダイスとロッドの形状を決定した摩擦荷重 196kN と 294kN のダンパーである。表-1 に検討対象ダンパーの一覧を示す。

3. 単体性能試験

3.1 試験方法

単体性能試験は、摩擦ダンパーの履歴特性に及ぼす加振速度と振幅の影響を調べるための基本性能試験と、設計時に想定したエネルギー吸収性能を摩擦ダンパーが有していることを確認するための地震時性能試験を実施した。基本性能試験から、摩擦ダンパーの加振速度及び振幅が変化しても、ダンパーは安定した履歴形状を有することを確認している⁴⁾。

地震時性能試験の各試験変数は、想定した補強建物の地震応答解析で得られたダンパーの加振速度、振幅およびエネルギー吸収量に基づき決定した⁵⁾。試験は、地震時の累積エネルギーを一定の速度で加振した定常加振と、補強建物

に設置したダンパーブレースの軸変形時刻歴を直接ダンパーに加振した非定常加振の 2 通りを行った。ここでは、温度上昇を計測するためにロッドを中空とした摩擦荷重 294kN のダンパーの試験結果について述べる。定常加振（試験名 V43, V65）の試験変数一覧を表-2 に、非定常加振（試験名 TAFT）に使用した軸変形時刻歴を図-2 に示す。

加振は、疲労試験機を用いて行い、ダンパーの軸変位と摩擦荷重、ロッド温度を計測した。試験方法を写真-1 に、ロッド温度の計測位置を図-3 に示す。

3.2 試験結果

地震時性能試験の試験結果一覧を表-3 に、V43, TAFT のダンパーの履歴曲線を図-4 に、定常および非定常加振時のエネルギー吸収量の時刻歴を図-5 に示す。定常加振および非定常加振の履歴形状は、エネルギー吸収性能が良好な完全剛塑性に近い履歴形状を示していること、また摩擦荷重はダンパーを繰返し加振することで、幾分摩擦荷重が上昇する傾向を示すものの、

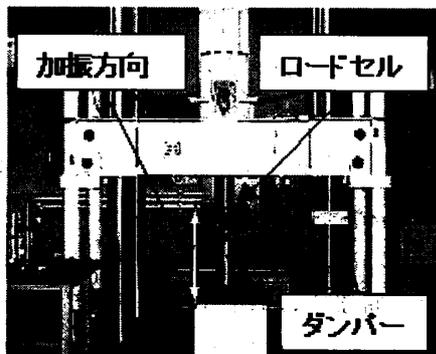


写真-1 試験方法

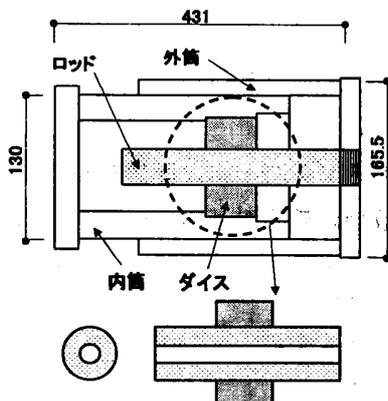


図-1 摩擦ダンパーの構成

表-1 検討対象ダンパーの一覧

摩擦荷重	ロッドの形状	試験体数	本論文の検討項目
98kN	中実・中空	21体	面圧と摩擦係数の関係
196kN	中実	1体	初期摩擦荷重の検討
294kN	中実	1体	初期摩擦荷重の検討
294kN	中空	1体	単体性能試験と温度上昇による影響

表-2 試験変数一覧

試験名	速度 [mm/sec]	振幅 [mm]	周期 [sec]	振動数 [Hz]	サイクル数 [回]	継続時間 [sec]
定常加振						
V43	43	4.3	0.4	2.5	40	16.0
V65	65	6.5	0.4	2.5	20	8.0

表-3 試験結果一覧

	初期温度 [°C]	外気温 [°C]	エネルギー吸収量 [kJ]	入熱量 [W]
V43	15.8	14.5	157.7	9859
V65	18.5	14.7	127.5	15936
TAFT	22.5	13.9	123.8	—

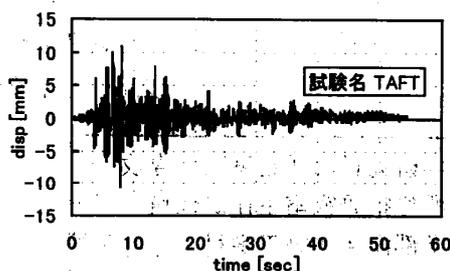


図-2 軸変形時刻歴

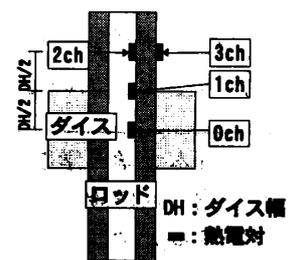


図-3 ロッド温度測定位置

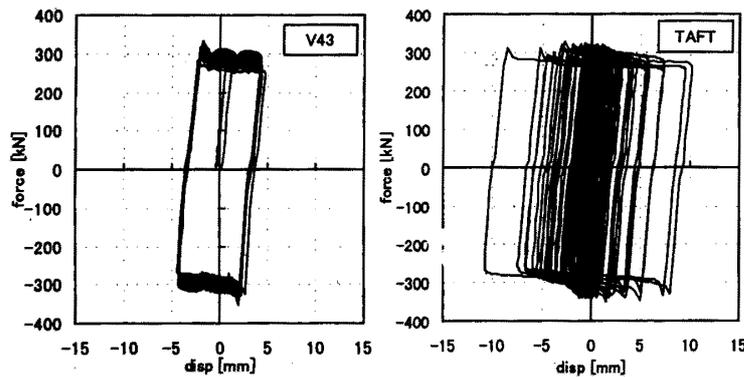


図-4 履歴曲線

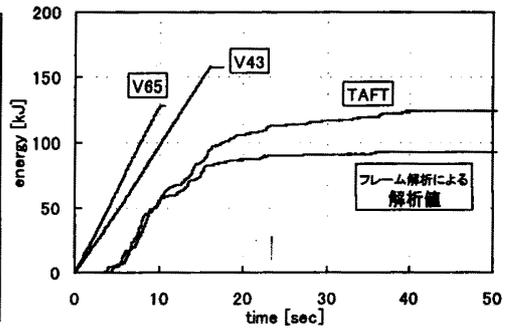


図-5 エネルギー吸収時刻歴

ほぼ安定しており、加振終了時までの、エネルギー吸収性能も安定していることがわかる。

4. 初期摩擦荷重を求める解析

図-6に示す外圧を受ける円柱と、内圧を受ける円筒の弾性理論解を用いる。ここでは、ロッドが中実で摩擦荷重196kNと294kNのダンパーを検討対象とした。

4.1 解析手法

力の釣り合い条件を式(1)、変形の適合条件を式(2)と設定して、接触面における締付力を求める。以下、添字 d, r は、それぞれダイス、ロッドを表す。

$$P_d = P_r \tag{1}$$

$$\delta_d + \delta_r = \Delta R \tag{2}$$

P_d, P_r : ダイス・ロッドの締付力[N], δ_d, δ_r : ダイス・ロッドの変形量[m], ΔR : ダイスの内径とロッドの外径の差[m]

ダイスとロッドの締付剛性 k_d, k_r は、弾性理論解⁶⁾により、式(3), (4)として表される。ここで、ロッドの有効長さ l_r は、ロッド内部で締付応力が45°方向に伝達すると仮定して、図-6に示す L と L' の平均長さとした。

$$k_d = \frac{2\pi \cdot (X^2 - 1)}{(1 - \nu_d) + (1 + \nu_d)X^2} \cdot E_d \cdot l_d \tag{3}$$

$$k_r = \frac{2\pi \cdot (Y^2 - 1)}{(1 - \nu_r) + (1 + \nu_r)Y^2} \cdot E_r \cdot l_r \tag{4}$$

k_d, k_r : ダイス・ロッドの締付剛性[N/m], ν_d, ν_r : ダ

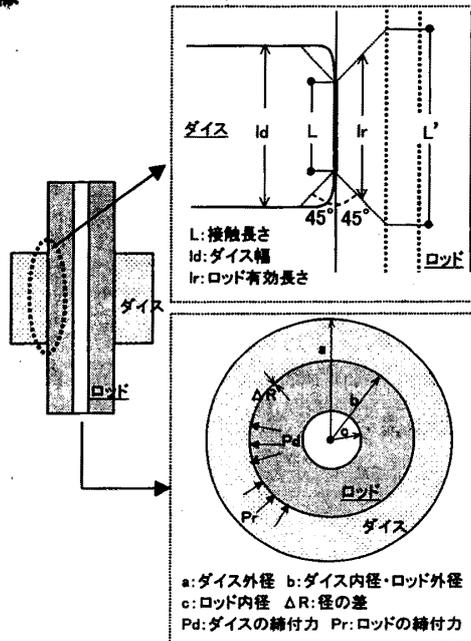


図-6 ダイスとロッドの形状

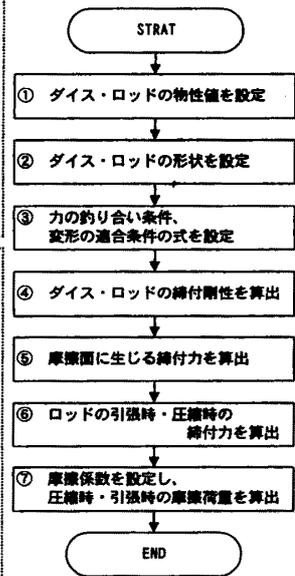


図-7 解析フロー

イス・ロッドのポアソン比, E_d, E_r : ダイス・ロッドのヤング係数[Pa], l_d, l_r : ダイス・ロッドの有効長さ[m], X: 外径/内径 (ダイス), Y: 内径/外径 (ロッド)

締付力 P_d, P_r は、式(1), (2)を変形して、下式により求める。

$$P_d = P_r = \frac{\Delta R}{1/k_d + 1/k_r} \tag{5}$$

ダンパーの摩擦荷重は、下式により計算する。

$$F = \mu \cdot P_d \tag{6}$$

F: 摩擦荷重[N], μ : 摩擦係数

また、ダンパー稼働時にはロッドに軸力が生じ、ロッドの外径が変化するので、軸力によるロッドの外径変化を考慮して摩擦荷重を求めている。解析フローを図-7に示す。

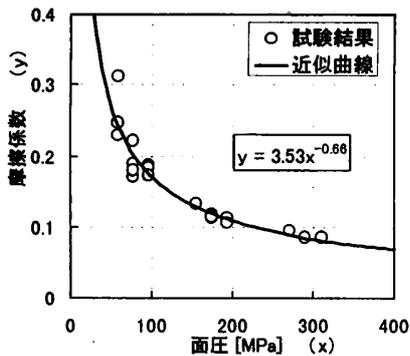


図-8 摩擦係数と面圧の関係

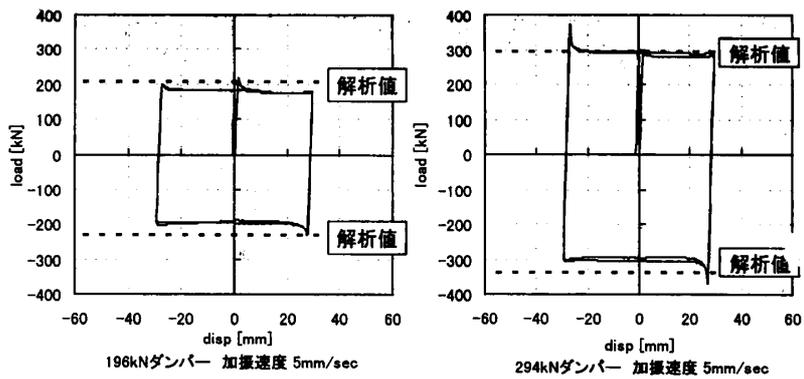


図-9 ダンパーの履歴形状と解析値の比較

4.2 摩擦係数の算定

ダイスとロッドの接触面の摩擦係数は、以下の方法により求めた。摩擦荷重98kNのダンパーを加振して、得られた摩擦荷重を弾性理論解を用いて求めた締付力で除すことで、ダンパーの摩擦係数を算定した。図-8に摩擦面の面圧（単位面積当たりの締付力）と摩擦係数の関係を示す。摩擦係数は面圧に依存しており、その関係を、図-8に示す曲線式 $y=3.53x^{-0.66}$ で近似した。

4.3 解析結果

ロッドが中実で摩擦荷重196kNと294kNのダンパーの製作は、所定の摩擦荷重を得るために、摩擦係数が安定する面圧を196Mpaとしてダイスとロッドの形状を決定した。ダンパーの履歴形状と解析値を比較して図-9に示す。所定の摩擦荷重が得られていることが確認できる。

5. 温度上昇の解析

5.1 解析手法

ダンパーを加振することで発生する摩擦熱は、ダイスとロッド内を伝導し蓄熱され、その後、空气中へ放熱される。ダンパー各部の温度上昇は、ダンパーを図-10のようにリング状に要素分割し、各要素間の熱移動量と各要素の蓄熱量を計算することにより求められる。以下にこの熱解析手法について述べる。

ダンパー内部要素（熱伝導要素）における熱

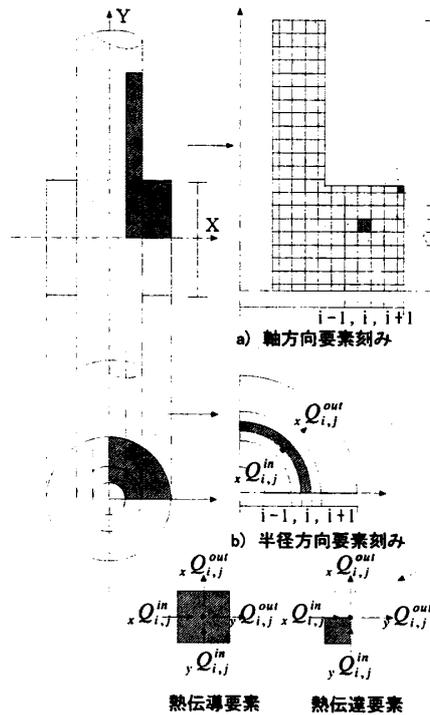


図-10 要素分割図

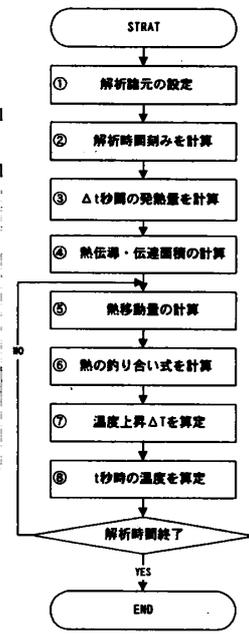


図-11 解析フロー

移動量 $Q_{i,j}^{in}, Q_{i,j}^{out}$ は、以下のフーリエの式⁸⁾を用いて算出される。

$${}_x Q_{i,j}^{in} = A_{i,j}^{in} \lambda (T_{i-1,j} - T_{i,j}) / \Delta x \quad (7, a)$$

$${}_x Q_{i,j}^{out} = A_{i,j}^{out} \lambda (T_{i,j} - T_{i+1,j}) / \Delta x \quad (7, b)$$

$${}_y Q_{i,j}^{in} = A_{i,j}^{in} \lambda (T_{i,j-1} - T_{i,j}) / \Delta y \quad (7, c)$$

$${}_y Q_{i,j}^{out} = A_{i,j}^{out} \lambda (T_{i,j} - T_{i,j+1}) / \Delta y \quad (7, d)$$

${}_x Q_{i,j}^{in}, {}_x Q_{i,j}^{out}$: 半径方向の入熱, 放熱量[J], ${}_y Q_{i,j}^{in}, {}_y Q_{i,j}^{out}$: 軸方向の入熱, 放熱量[J], i, j: 半径方向, 軸方向の要素番号, A: 各要素間の面積[m²], λ: 熱伝導度 [W/m·K], Δx, Δy: 半径方向, 軸方向の要素刻み幅[m], $T_{i,j}$: i, j 要素の温度[°C]

また、空気への放熱量は、以下のニュートンの冷却則⁸⁾を用いて算出される。

$$Q_c = A_{i,j}h(T_{i,j} - T_F) \quad (8)$$

h:熱伝達係数[W/m²·K], T_F:空気温度[°C]

以上で求められた熱移動量 Q_{i,j}ⁱⁿ, Q_{i,j}^{out} を熱の釣り合い式(熱力学第3法則)に代入し、温度上昇 ΔT_i を求める。

$$\left(\sum Q_{i,j}^{in} - \sum Q_{i,j}^{out}\right)\Delta t = V_{i,j}\rho c\Delta T_{i,j} \quad (9)$$

$$\therefore \Delta T_{i,j} = \frac{\left(\sum Q_{i,j}^{in} - \sum Q_{i,j}^{out}\right)\Delta t}{V_{i,j}\rho c} \quad (10)$$

Q_{i,j}ⁱⁿ, Q_{i,j}^{out}:i,j 要素における熱の入出量[W], V_{i,j}:i,j 要素の体積[m³], ρ:密度[kg/m³], c:比熱[J/kg·K], Δt:解析時間刻み[sec]

ただし、摩擦面に接している要素については、入熱量 Q_{i,j}ⁱⁿ に摩擦熱 Q₀ を加えた。摩擦面は移動せず、ダイス幅全面で一様に摩擦熱が発生すると仮定し、Q₀ はダンパーの履歴エネルギーがすべて摩擦熱に変換されるとして計算した。

なお、解析時間刻み Δt については、隣合う要素が急激な温度上昇を起こさないように、無次元数 m (=4) によって下式のような制限を与えた。

$$\Delta t = \frac{\rho c \Delta x^2}{\lambda m} \quad (11)$$

また、外気温度については加振前後で一定温度とした。解析フローを図-11に、物性値を表-4に示す。

解析は、ロッドが中空で摩擦荷重 294kN のダンパーについて、定常加振 V43 と非定常加振 TAFT を対象に行った。なお、定常加振 V43 の解析では、加振終了時までの累積エネルギー吸収量を加振継続時間で除した値を摩擦熱 Q₀ として与えた。また、非定常加振 TAFT の解析では、解析時間刻みごとのエネルギー吸収量を時々刻々変化する摩擦熱 Q₀ として与えた。

5.2 解析結果

摩擦面中央位置のロッド中空面の温度時刻歴(0ch)と、0ch からダイス幅(100mm)離れた位置のロッド中空面の温度時刻歴(2ch)の実測値と解析値を比較して図-12に示す。V43.TAFT いずれの加振に対しても、解析値は、温度の登り勾配および下り勾配に至るまで実測値と解析値がよく一致していることがわかる。

また、図中に示した概算値は、累積エネルギー吸収量に相当する熱量をロッドとダイスの熱容量で除して求めたダンパーの温度上昇である。ただし、ロッドの体積はダイス幅までとした。概算値は概ね実測値を捉えている。

表-4 物性値

	単位	ダイス	ロッド*
熱伝導度	[W/m·K]	42.2	61.0
密度	[kg/m ³]	7750	8800
比熱	[kJ/kg·K]	0.46	0.37
熱伝達係数	[W/m ² ·K]	10	10
ヤング係数	[GPa]	197.9	184.0
せん断弾性係数	[GPa]	78.8	39.8
線膨張係数	[×10 ⁻⁶ /°C]	11	18

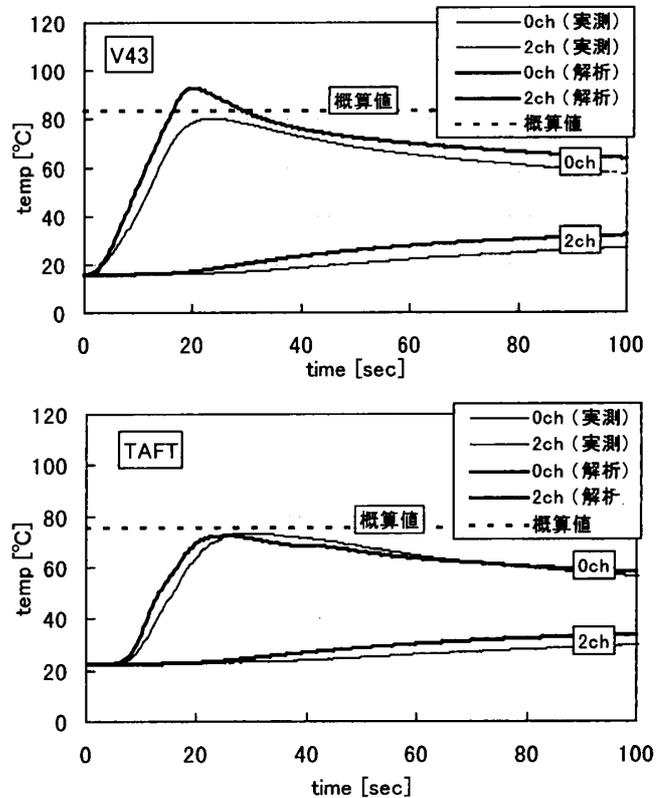


図-12 温度時刻歴

6. 温度上昇による摩擦荷重の解析

6.1 解析手法

摩擦ダンパーは、地震時に発生する摩擦熱によりロッドが膨張し、ダイスによって締付力が上昇して摩擦荷重が上昇すると考えられる。このことを解析的に捉えることを目的に、摩擦熱によるダイスとロッドの温度応力解析を行った。すなわち、温度上昇を求める解析より得られた摩擦熱によるダイス、ロッドの温度上昇から、摩擦面に生じる締付力の上昇を弾性 FEM 解析による 2 次元面内温度応力解析によって求めた。

ロッドとダイスを図-13 のように要素分割した。ロッド要素とダイス要素の境界節点は、リンクバネ（剛バネ）で結合し、温度上昇時のロッドの締付力（摩擦力）を、このバネの放線方向の垂直応力から算定した。要素温度は、摩擦熱による熱解析で得られた結果のうち、ダイス幅までの要素の温度を平均して与えた。図-14 に解析フローを示す。

6.2 解析結果

解析は、その評価が容易である定常加振 V43, V65 について行い、摩擦係数は 0.1 として計算した。図-15 に摩擦荷重上昇の実測値と解析値を比較して示す。実測値の摩擦荷重は、平均摩擦荷重（1 サイクルの履歴面積をダンパーの滑り量で除した値）を、解析値は 1 サイクル目の平均摩擦荷重に解析で得られた摩擦荷重上昇分を加えて示す。摩擦荷重の実測値は、まず時間の経過と共に荷重上昇し、その後荷重上昇に頭打ちが見られ、最後に荷重が若干低下す

る傾向が見られた。解析値は、荷重の上昇部分において実測値を追跡できたが、それ以降の現象は追跡できなかった。

7. まとめ

想定した補強建物の地震応答解析に基づく単体性能試験により、摩擦ダンパーの繰返し加振による影響を調べ、地震終了時までのエネルギー吸収性能を有することを確認した。また、初期摩擦荷重を求める解析、温度上昇の解析、温度上昇による摩擦荷重の解析を行い、実測値を数値解析により説明し得ることを示した。

謝辞

本研究は、日本大学と青木建設の共同研究「損傷低減のための耐震補強技術に関する研究」の成果の一部であり、関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の震災復旧・耐震補強技術と事例，1.3.7 制震補強，pp.159-162，1998.8
- 2) 北嶋圭二，上田英明，中西三和，安達洋：ダンパーを用いた既存 RC 造建物の補強技術に関する研究，コンクリート系構造物の耐震技術に関するシンポジウム(日本コンクリート工学協会)，pp.283-292，1997.4
- 3) 北嶋圭二，上田英明，中西三和，安達洋：ダンパー補強された鉄筋コンクリート造骨組の仮動的実験，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19，No.2，pp.339-344，1997.6
- 4) 上田英明，北嶋圭二，横山博至，大西博之，田中稔，中西三和，安達洋：ダンパーを用いた既存 RC 造建物の耐震補強法に関する研究（その 14.摩擦ダンパーの単体性能試験），日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，pp.167-168，1998.9
- 5) 築井英昭，北嶋圭二，野口隆，上田英明，鈴木信治，中西三和，安達洋：ダンパーを用いた既存 RC 造建物の耐震補強法に関する研究（その 7.ダンパー補強建物の応答性状と補強設計例），日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，pp.571-572，1997.9
- 6) 日本機械学会：機械工学便覧 A4 材料力学
- 7) 日本潤滑学会：潤滑ハンドブック 改訂版
- 8) 化学工学協会：化学工学便覧（改訂 5 版）

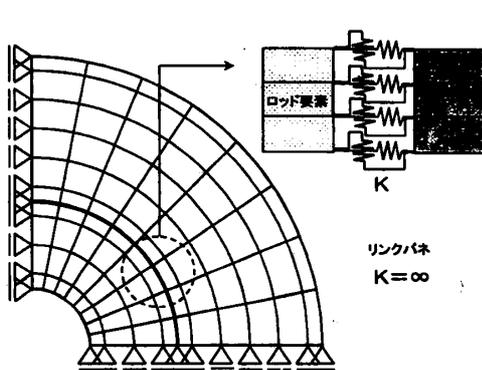


図-13 要素分割図

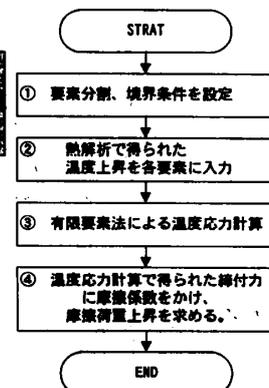


図-14 解析フロー

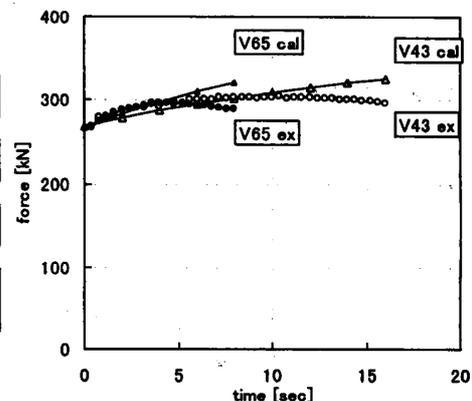


図-15 摩擦荷重上昇