

1. 制震ブレースを用いた耐震補強工法

Seismic Retrofit Method by Means of Damping Braces

上田英明* 北嶋圭二**

—概要—

本制震補強工法は、建物の外壁面に制震ブレース（鋼管ブレースの軸芯に摩擦ダンパーを組み込んだブレース）を取付け、地震時に建物が揺れるエネルギーを吸収することで、既存建物の耐震性能を向上させるという補強工法である。従来の補強工法では、サッシュや内装材を一度撤去して補強部材を取り付け、再度復旧する必要があるが、補強工事中に建物が継続使用できないという問題があったが、本工法では、建物の外壁面に制震ブレースを取り付けるだけなので、建物を使用したままで補強工事ができる。これにより、工事工数が大幅に削減され、低コスト・短工期で補強工事ができるという特長を有している。内装解体時に搬出される廃材や騒音も少なく「環境にやさしい補強工法」ともいえる。

—技術的な特長—

- ・エネルギー吸収性能が明確で、微小変形から吸収しはじめる摩擦ダンパーを使用
- ・制震ブレースの強度と剛性が各々独立に設定可能
- ・既存建物との接合部への作用荷重が明確

—摩擦ダンパーの性能—

- ・速度、振幅、温度に対する依存性はほとんどない
- ・多数回の地震にも安定した性能を発揮
- ・長期にわたって安定した性能を発揮

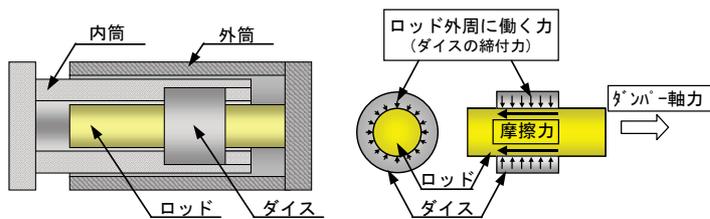


図1 摩擦ダンパーの機構(概念図)



写真1 制震ブレースの取付例



写真2 実験が行われた校舎の全景と実験状況

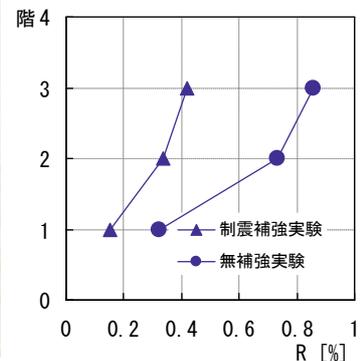


図2 補強前後の最大層間変形角

*技術研究所建築研究室 **日本大学

制震ブレースを用いた耐震補強工法 Seismic Retrofit Method by Means of Damping Braces

○上田 英明* 北嶋 圭二**
Hideaki AGETA Keiji KITAJIMA

ABSTRACT This paper presents an application of the response control retrofit method to reinforced concrete(R/C) buildings. In this seismic retrofit method developed for R/C buildings without sufficient ductility, the seismic capacity of an existing building is enhanced by installing steel damping braces on the external walls of the building to absorb seismic energy efficiently within small amplitudes of deformation. A friction damper is embedded in each brace along its axis. The building can be used during the retrofitting work and the man-hours are reduced significantly as well as the cost and the period of the work. In view of the seismic retrofit design, the strength and the stiffness of the damping brace can be controlled independently by means of the frictional force induced between the damper and the cross section of the brace. The frictional force acting on the damping brace is known to be about 300kN, the brace anchorage can be designed reliably against this working frictional force. The effect of this damping retrofit method has been confirmed through the full-scale seismic tests using a three-story R/C school building planned to be demolished.

Keywords: 耐震補強, 制震ブレース, 摩擦ダンパー
Seismic Retrofit, Damping Braces, Friction Damper

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震では、新耐震設計法以前の旧基準で設計された建物に甚大な被害が生じ、既存不適格建物の耐震補強の必要性が改めて認識される結果となった。その教訓より「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が1995年12月に施行された。これ以降、災害時の防災拠点となる学校建物や庁舎などの耐震診断、補強が先行して行われ、近年では、共同住宅や民間建物に対しても、積極的に耐震診断・耐震補強が実施される状況にある。

既存建物の耐震補強は、新規建物の設計とは異なり、補強工事中や補強後の建物の使い勝手などに制約が多く、強度や変形性能を向上させる従来の補強方法だけでは、これらの問題に対応できないことが多い。

筆者らは、建物を使用しながら工事が可能な補強方法として、既存建物のサッシュや内外装材を

存置したまま、建物外壁面に制震ブレースを取り付けることで補強工事が可能な制震補強工法を開発し、推進してきた。本報では、本補強方法の概要、研究開発の概要について記し、解体予定の既存建物を用いて行った補強効果確認のための実大実験など、主な研究内容について述べる。

2. 本補強工法の概要

2.1 特長

本制震補強工法は、建物の外壁面に制震ブレース(鋼管ブレースの軸芯に摩擦ダンパーを組み込んだブレース)を取付け、地震時に建物が揺れるエネルギーを吸収することで、既存建物の耐震性能を向上させるという補強工法である。日本大学と青木あすなろ建設(旧青木建設)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(1)~(3)(1995年11月~1998年10月)」²⁾(主査:安達洋日本大学名誉教授)により研究・開発した工法である。従来の補強工法では、サッシュや内装

*技術研究所 建築研究室

**日本大学 准教授

材を一度撤去して補強部材を取り付け、再度復旧する必要があり、補強工事中に建物が継続使用できないという問題があったが、本工法では、建物の外壁面に制震ブレースを取り付けるだけなので、建物を使用したままで補強工事ができる。これにより、工事工数が大幅に削減され、低コスト・短工期で補強工事ができるという特長を有している。内装解体時に搬出される廃材や騒音も少なく「環境にやさしい補強工法」ともいえる。

2.2 取付方法

制震ブレース取付例を写真1に示す。制震ブレースは、既存建物（主体構造）の梁端部および中央部に定着台を介して取付ける。定着台と梁側面との間にグラウト材を充填し、PC鋼棒により圧着接合方式³⁾で主体構造に一体化する。写真1の例では、23φのPC鋼棒4本で一つの定着台が固定されている。取付部分は、ブレースに作用する荷重の1.5倍の荷重に対し、剛接の条件を満足

するように設計されている。

写真2は、某公立中学校の補強例である。この例では、バルコニー床上面と下面を定着台で挟み、



写真1 制震ブレースの取付例



写真2 某公立中学校の補強例

床下で梁に圧着する方法⁴⁾を採用している。また、基礎梁へは、あと施工アンカーによる間接接合方式⁵⁾で固定している。

2.3 摩擦ダンパーの機構と性能

摩擦ダンパーの機構を図1に示す。本摩擦ダンパーは、ダイスとロッド、内筒、外筒により構成されている。ダイスには、ダイス内径より少し太いロッドがはめ込まれており、一定の摩擦荷重を保持したままでロッドが軸方向に変位する。地震時に建物が揺れるエネルギーは、制震ブレースに組み込まれた摩擦ダンパーが軸方向に繰り返し変位することにより、摩擦熱に変換され吸収される。

摩擦ダンパー単体の履歴特性を図2に示す。本ダンパーは、エネルギー吸収効率の高い完全弾塑性型の履歴特性を示し、繰り返しによっても摩擦荷重はほとんど変動せず、明確なエネルギー吸収性能を示す。また、速度・振幅依存性や温度依存

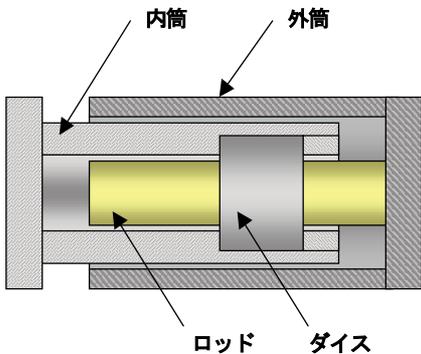


図1 摩擦ダンパーの機構 (概念図)

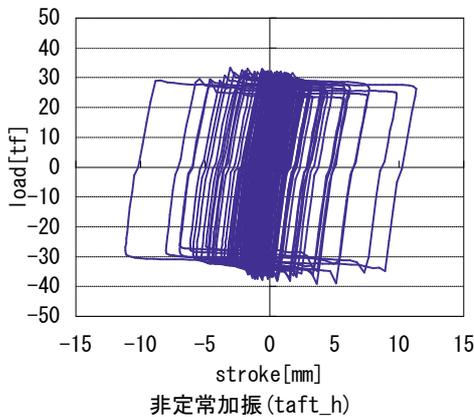


図2 摩擦ダンパー単体の履歴特性 (非正常加振試験結果)

性がほとんどなく、完全弾塑性型 (バイリニア) の解析モデルで表現することができ、解析上での扱いが容易であることが特長の一つである。図2は、地震応答解析で得られたダンパーの変位履歴によって、ダンパーを高速加振した時の試験結果⁵⁾である。

2.4 制震補強法の考え方

一般的な耐震補強法は、耐震壁や枠付鉄骨ブレース等を増設し建物の強度を増す「強度抵抗型補強」や、柱や梁、耐震壁などの主体構造の変形性能を向上させる「靱性抵抗型補強」、これらを組合わせた「強度・靱性抵抗型補強」に大別される⁶⁾。図3にこれらの補強法の概念図を、図4に枠付鉄骨ブレースの取付方法を示す。

地震時に入力されるエネルギーを建物でいかに吸収するかというエネルギー論的観点⁷⁾からこれらの補強法を考えると、「強度抵抗型補強」では、補強部材に大きな力を負担させ建物強度を増し、入力エネルギーを弾性ひずみエネルギーとして蓄えて構造減衰で吸収することになる。したがって、既存部分への取付部には力の伝達が十分に行えるようにアンカー筋を密に配置し、かつ、

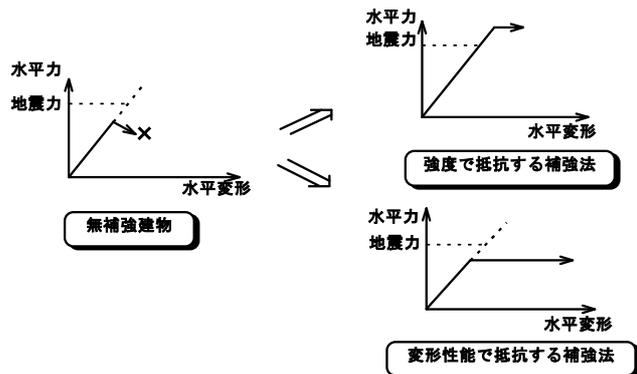


図3 従来の補強法の考え方 (概念図)

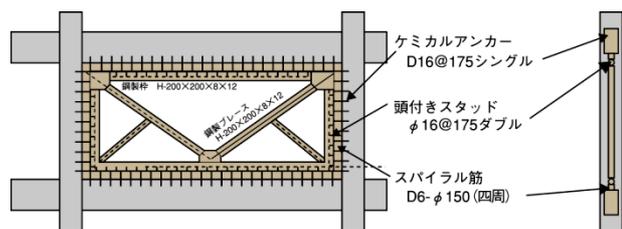


図4 枠付鉄骨ブレースの取付方法

スパイラル筋等を挿入して取付部の破壊防止に務めなくてはならない。また、「靱性抵抗型補強」では、変形性能が改善された主体構造の塑性ひずみ(履歴)エネルギーで入力エネルギーを吸収することになり、主体構造の損傷にエネルギー吸収を期待することになる。

一方、制震補強法は、既存建物はそのままにしておきエネルギー吸収性能が明確なダンパーを付加的に取付けることで地震時に建物が揺れるエネルギーを吸収し、建物の応答変位を既存架構の変形能力以下に低減させる補強法である。制震補強法は、「応答制御型補強」に分類される。図5に制震補強法の概念図を、図6にダンパーが組み込まれた制震ブレースの取付方法を示す。この場合、補強部材(制震ブレース)に要求される性能は、いかに大きな力を負担させるかではなく、いかに効率よくエネルギーを吸収させるかということである。エネルギー吸収性能を付加するということは、減衰効果を付加するということなので、「強度抵抗型補強」の付加強度より、小さな強度で従来の補強法と同等以上の補強効果を得ることができる。したがって、1ヶ所あたりの補強部材の負担強度(ダンパー強度)を大幅に減らし、簡易な取付方法によって居ながら補強を可能することができる。

図7は、従来の補強法(図3)と制震補強法(図

5)を、入力地震動の C_B-S_D スペクトル⁸⁾上にしたものである。制震補強時には減衰性能が増すことにより、既存建物に要求される強度と変形性能が低減されることを示している。

3. 研究・開発の概要

本研究では、補強の必要性が高いと考えられる中低層のRC造建物を補強対象建物として研究を行った。ダンパーには、エネルギー消費効率が高い剛塑性型の履歴特性を示す摩擦ダンパーを開発し、鋼製ブレースの軸心に組込んだダンパー付きブレース(制震ブレース、またはダンパーブレースと呼ぶ)を補強部材として用いることを前提とした。この方法を研究開発の前提としたのは、既存の中低層RC造建物は変形性能が乏しく、制震補強することにより応答変位を変形能力以下(例えば、層間変形1/250以下)に抑えるためには、エネルギー消費効率が高いダンパーが必要であること、また、応答制御設計を容易にするためには、制震ブレースの強度と剛性を各々独立して設定できるようにする必要があると考えたからである。研究のフローを図8に示す。

(a) ダンパー補強の有効性の確認

本研究では、まず補強対象建物の無補強、強度補強、制震補強(または、ダンパー補強と呼ぶ)時の耐震性能について、既往の耐震診断法と高層建物や免震建物の設計で用いられる応答解析手

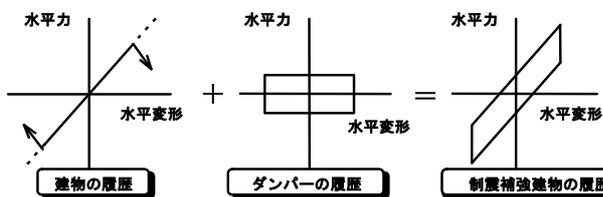


図5 制震補強法の考え方(概念図)

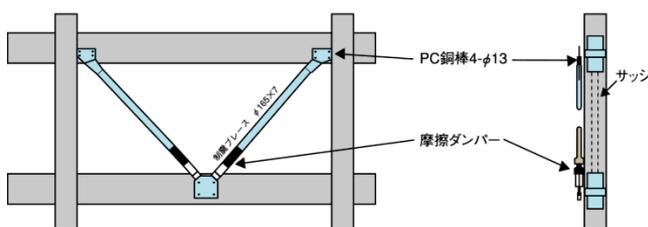


図6 制震ブレースの取付方法

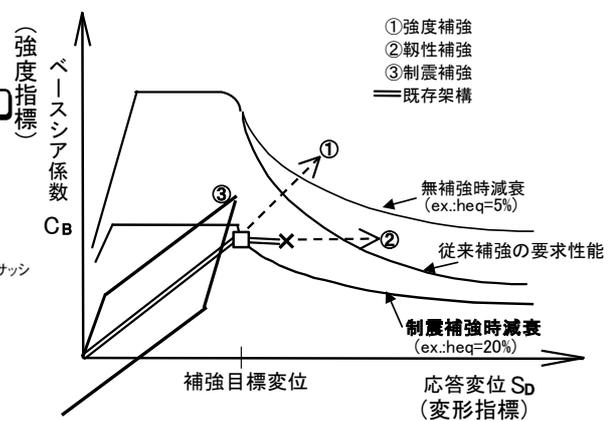


図7 応答スペクトル上での制震補強の概念

法を用いて各々の耐震性能について検討した。その結果、既存建物に制震ブレースを組み込むことにより応答変位が低減され、中低層 RC 造建物に対して制震補強が有効であることを解析的に確認した⁹⁾。

(b) ダンパー補強建物の応答特性の研究

次に、ダンパー補強建物の応答特性を把握するために、応答変位とダンパー強度の関係、および応答変位とダンパーブレース剛性について解析的に検討した。ここでは、地震時に投入される入力エネルギーと建物の吸収エネルギーの釣合いに基づく応答予測式を定式化し、ダンパー補強建物の応答特性を明らかにした¹⁰⁾。

(c) 設計ケーススタディ

さらに、本補強法をより具体的に実現させるために、試設計建物を対象に補強設計のケーススタディを行った。ここでは内装をできるだけ存置したままダンパーブレースが取り付けられ、かつ、ダ

ンパー性能が十分に発揮できるような定着方法と具体的な納まり等について検討した¹⁰⁾。

(d) 取付方法の開発とフレーム実験

実験的には、摩擦ダンパーの単体性能試験とダンパーブレースの取付部の実大実験³⁾を実施し、補強設計で想定した個々の性能を確認した。また、縮尺 1/3 の 2 層 2 スパンの柱せん断破壊型 RC 造骨組をダンパー補強し、仮動的実験により補強システム全体としての性能を調べた。仮動的実験では、レベル 2 相当の入力地震動に対して、柱がせん断破壊しない変位レベルに応答変位が低減され、ダンパーを取付けることにより十分な補強効果が得られることを確認した¹¹⁾。

(e) 摩擦ダンパーの実用化

この時点までは、摩擦ダンパーの模型を試作し実験していたが、本補強法の実用性が高いと判断したため、摩擦ダンパーの実用化のための研究・開発を進めた。実用化にあたっては、ダンパーの

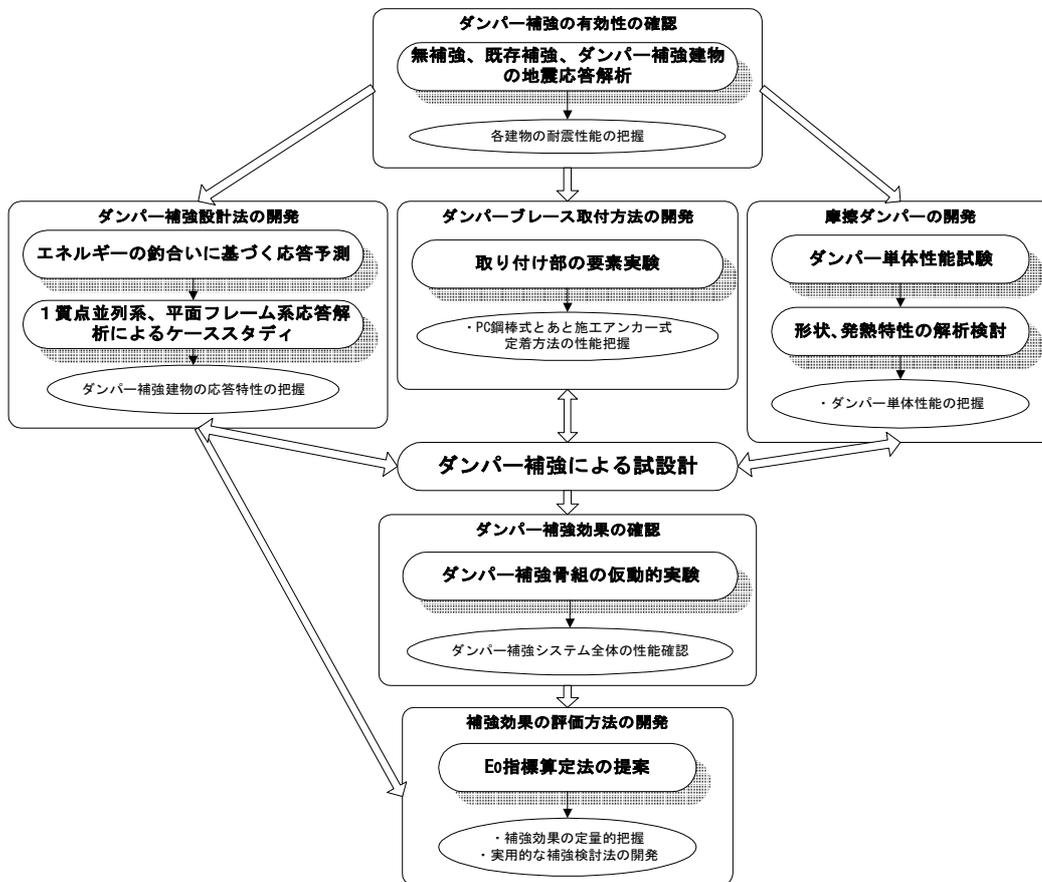


図 8 研究のフロー

ダイスとロッドの形状と摩擦荷重の関係、繰り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、温度上昇による摩擦荷重への影響などの諸現象を、数値解析により再現・説明できることを示し、ダンパー性能の信頼性を高めた⁵⁾。また、多数回の繰り返しによるダンパーの限界性能試験や、経年特性を把握するための劣化促進試験・大気暴露試験等を実施し、本摩擦ダンパーを実用化しても問題ないことを確認した¹²⁾。

(f) 補強設計方法の開発

一方、実用的な制震補強設計方法として、補強概算検討方法を開発した。通常、制震補強設計時には、地震応答解析を行い、補強後の建物が変形クライテリアを満足していることを確認する必要がある。しかし、耐震診断・補強設計手法と同じ流れの中で、制震補強の検討ができれば実用的である。そこで、ダンパー補強建物の耐震性能を耐震診断と同じ尺度で評価する方法について検討し、補強効果を I_s 指標で評価する算定式を提案した^{13), 8)}。また、等価線形化手法によっても補強検討できることを示し⁸⁾、これらの手法により、耐震診断結果から直接、補強概算検討が行えるようにした¹⁴⁾。

(g) 既存校舎を用いた制震補強効果の確認実験

これらの研究・開発を経て本補強法を実用化し、実際の補強工事の実績ができはじめた頃、解体予定の学校校舎を利用した実大構造物実験の機会を得た。3階建てRC造建物を本補強法で制震補強し、屋上にアクチュエータを設置して仮動的実験を行い、実構造物に対する制震補強効果を確認した^{15), 16)}。

4. 研究・開発の内容

ここでは、前章で述べた研究成果のうち、(b)ダンパー補強建物の応答特性の研究、(d)取付方法の開発とフレーム実験、(e)摩擦ダンパーの実用化、(f)補強設計方法の開発、(g)既存校舎を用いた制震補強効果の確認実験の内容について記す。

4.1 ダンパー補強建物の応答特性¹⁰⁾

制震補強設計は「応答変形制御設計」であり、制震補強法の開発にあたっては、ダンパー強度と応答変位の関係を把握しておく必要がある。ここでは、地震時のエネルギー授受の釣合いに基づき、ダンパー強度と応答変位の関係を定式化し、1質点並列系の応答解析結果よりその妥当性を検証した。また、フレーム系応答解析により、中低層建物に対しても応答予測式が適用可能であることを確認した。

(a) エネルギーの釣合いに基づく応答予測式

地震により建物へ投入されるエネルギーと建物の消費エネルギーの釣合式は、振動方程式の両辺に微小変形 $dx(=x \cdot dt)$ を掛け、地震の全継続時間 t_0 まで積分することにより(1)式のように表すことができる。

$$\int_0^{t_0} \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_0^{t_0} \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^{t_0} \{\dot{x}\}^T \{Q(x)\} dt = - \int_0^{t_0} \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}_0\} dt$$

(建物加速度エネルギー-EI) + (減衰消費エネルギー-EH) + (履歴消費エネルギー-EK) = (地震総エネルギー-入力-ED)

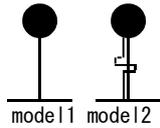
(1)

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ は質量、減衰マトリックス、 $\{Q(x)\}$ は復元力ベクトル、 $\{X\}$ 、 $\{\dot{X}\}$ 、 $\{\ddot{X}_0\}$ は応答加速度、応答速度、地動加速度ベクトル、 dt は時間刻みを表す。

また、履歴消費エネルギー (EK) は、(2)式のように主体構造消費エネルギー (EKstr) とデバイス消費エネルギー (EKdev) に分離する。

$$EK = EKstr + EKdev \quad (2)$$

応答予測式は、(1)式と(2)式を用いて定式化する。ここでは、1質点系の応答予測式として定式化する。まず、(2)式の主体構造消費エネルギー (EKstr) とデバイス消費エネルギー (EKdev) は、各々の最大負担せん断力 ($Qstr$, $Qdev$) と最大応答変位 (δmax) の積と、主体構造とデバイスのエネルギー消費効率を表す指標 (A, B) を用いて(3)式のように表現できるものと仮定する。



入力地震波：ElCentro-NS (534gal, 50kine)
 解析モデル：主体構造 + ダンパー
 履歴モデル：武田モデル + バイリニアモデル
 (重量W=980kgf)
 解析変数：主体構造弾性周期
 0.25, 0.5, 1.0, 2.0[sec]
 主体構造負担せん断力係数(α_{str})=0.3
 ダンパー負担せん断力係数(α_{dev})
 0.0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
 剛性比(K_{dev}/K_{str})
 0.0→4.72(7分割)

図9 解析諸元

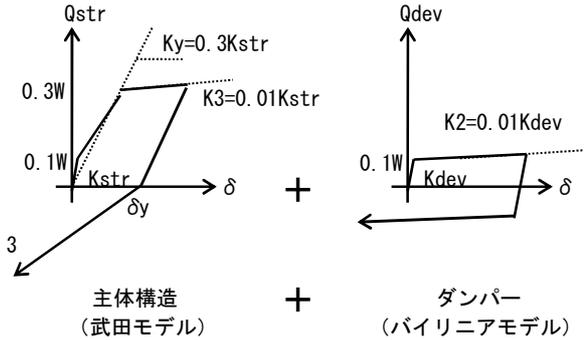


図10 履歴モデル

$$EK = EK_{str} + EK_{dev} = A \cdot Q_{str} \cdot \delta_{max} + B \cdot Q_{dev} \cdot \delta_{max}$$

$$= \{A \cdot Q_{str} + B \cdot Q_{dev}\} \cdot \delta_{max} \quad (3)$$

履歴消費エネルギー (EK) を速度換算して(4)式のように表し、(3)式両辺を建物重量 ($W=Mg$) で除すと応答予測式は(5)式のように表現できる。

$$EK = \frac{1}{2} M \times V_{EK}^2 \quad (4)$$

$$\delta_{max} = \frac{V_{EK}^2}{2 \times g \times (A \times \alpha_{str} + B \times \alpha_{dev})} \quad (5)$$

ここで、 $\alpha_{str} = Q_{str}/Mg$ および $\alpha_{dev} = Q_{dev}/Mg$ で、主体構造負担せん断力係数およびデバイス負担せん断力係数をそれぞれ表す。

ここでの応答予測式は、文献(17)の免震構造の応答予測式におけるアイソレータとダンパーの並列系の抵抗機構を、主体構造とダンパーの並列系の抵抗機構に置き換え拡張したものに相当する。

(b) 応答予測式の検証

ダンパー強度とダンパー剛性をパラメータとした1質点並列系の応答解析結果を行い、ダンパー補強建物の応答特性の把握と、(5)式の応答予測式の妥当性を検証する。解析諸元および解析モデルをそれぞれ図9、図10に示す。

図11に、主体構造の弾性周期が0.25sec、ダンパー剛性比(K_{dev}/K_{str})=1.0のときの解析結果を示す。図中の曲線(実線および破線)は、(5)

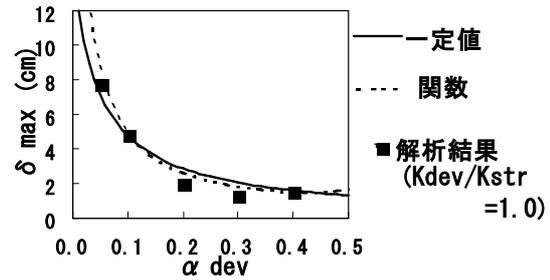


図11 応答予測曲線と解析結果の比較

式の応答予測式で得られた応答予測曲線である。応答予測式中のパラメータである V_{EK} 、 A 、 B の値を、一定値とした場合 ($V_{EK}=130$ 、 $B=12.0$ 、 $A=2.0$) と、 α_{dev} の1次関数とした場合を示している。

図より、最大応答変位はダンパー強度 (α_{dev}) の増加に伴い減少すること、両応答予測曲線とも解析で得られたダンパー強度と応答変位の関係をよく再現していることがわかる。すなわち、補強目標変位を設定すれば、どの程度のダンパー強度を設置すればよいか、概ね把握できることを示している。

(c) フレーム解析によるケーススタディ

さらに、4階建てのRC造建物をダンパー補強した場合にも、上記のような応答特性を示すことを、平面フレーム系の応答解析を行い確認した。補強対象建物は、典型的な学校建築を想定して旧基準で試設計した4階建て校舎とした。構造形式は8×1スパンの耐震壁付ラーメン構造、柱断面寸法は60×65cm ($p_g=1.76\%$ 、 $p_w=0.08\%$)、桁行き梁断面寸法は35×80cm ($p_t=1.17\%$ 、 $p_w=0.12\%$)である。耐震壁が少ない桁行方向について補強設計を行い、ダンパーブレースを桁行方向の2つの

構面に対称に配置した。補強建物の平面および軸組を図12に示す。

・**解析方法** 解析は、柱、梁端および壁脚に材端曲げ剛塑性バネを有する平面骨組弾塑性解析プログラムを使用した。主な解析仮定は文献(9)と同様である。ダンパーブレースのモデルは、ダンパーとブレースを一体化した線材に置換し、バイリニアの履歴特性を示すトラスモデルとした。ケーススタディは、ダンパー強度とブレース軸剛性をパラメータとして、11ケースの地震応答解析を行った。入力地震波としてEL CENTRO<NS>の加速度波形を、地動最大速度 50cm/sec (レベル2相当)に増幅させて使用した。ダンパー強度をパラメータとした解析では、1本当たりのダンパー強度(N)を33~250kN(1層のダンパー負担せん断力係数： $\alpha_{dev}=0.016\sim 0.121$)に変化させた(ブレース軸剛性一定(断面積=35.1cm²))。ブレース軸剛性をパラメータとした解析では、ブレース断面積を14.0~70.1cm²に変化させた(ダンパー強度一定：100kN)。

・**解析結果** ダンパー強度をパラメータとした解析結果を表1、図13に示す。解析結果は、水平外力の重心位置と考えられる3層変位(4階床変位)と1層層間変位の最大値について示している。図より、ダンパー強度が大きくなるにしたがい、3層および1層の最大応答変位はともに小さくなっていくことが

わかる。柱がせん断破壊しない変位レベル(層間変形角 $R=1/200\sim 1/150$)を補強設計の目標変位として定めると、ダンパー強度が100kN ($\alpha_{dev}=0.05$)以上あれば、最大応答変位を目標変位以内に抑えることができる。

なお、図中の太破線は、(5)式で求めた応答予測曲線である。フレーム解析結果を、1層層せん断力と3層変位(4階床変位)を用いて等価な1質点系で表せると仮定して本解析結果に適用した。1層層間変位の予測曲線(細破線)は、3層予測変位を1/3して求めている。なお、応答予測式での V_{EK} 、A、Bは、 $\alpha_{dev}=0.05$ のときの解析結果($V_{EK}=110$ 、 $A=1.0$ 、 $B=18.0$)の値を用いている。フレーム解析結果においても、応答予測曲線と解析結果はよく対応していることが図よりわかる。これは、補強検討建物が4階建てと比較的低層であり、かつ、ダンパー補強することにより特定層への変形集中が無くなるため、振動系が1次モード支配型となっているためと考えられる。

ブレース軸剛性(断面積)をパラメータとした解析結果を表2、図14に示す。図より、最大応

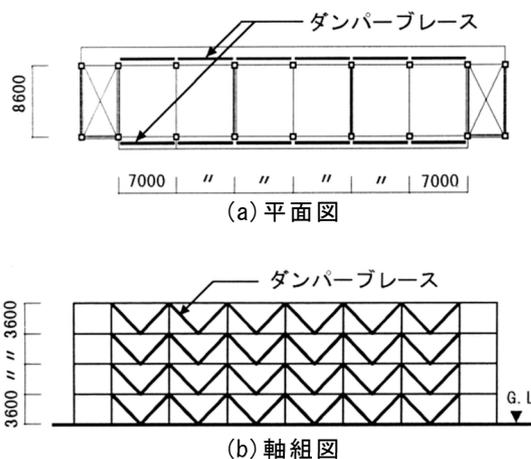


図12 建物概要

表1 ダンパー強度の影響

N (kN)	α_{dev}	C_B	D3f (cm)	D1f (cm)
0	0.00	0.39	10.41	3.52
33	0.02	0.48	8.29	3.36
67	0.03	0.50	5.91	2.26
100	0.05	0.51	4.58	1.81
133	0.07	0.51	3.69	1.68
167	0.08	0.51	3.31	1.45
250	0.12	0.61	2.79	1.25

N : 1本当たりのダンパー強度
 α_{dev} : 1層のダンパー負担層せん断力係数
 C_B : 1層層せん断力係数
 D3f : 3層変位(4階床変位)
 D1f : 1層層間変位

表2 ブレース軸剛性の影響

A (cm ²)	T (sec)	K_{dev}/K_{str}	D3f (cm)	D1f (cm)
0.0	0.34	0.00	10.41	3.52
14.0	0.30	0.33	5.66	2.22
28.0	0.27	0.63	4.70	2.01
35.1	0.26	0.77	4.58	1.81
42.1	0.25	0.91	4.51	1.77
70.1	0.22	1.41	4.38	1.75

A : ブレース断面積
 T : 弾性1次周期
 K_{dev}/K_{str} : 無補強時に対する剛性比(1次周期より算定)
 D3f : 3層変位(4階床変位)
 D1f : 1層層間変位

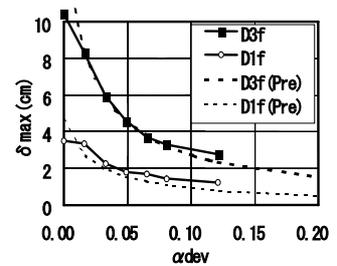


図13 最大応答変位—ダンパー強度関係

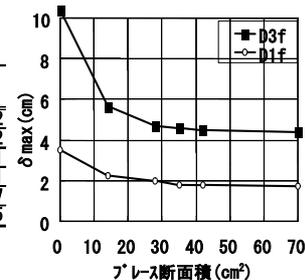


図14 最大応答変位—ブレース軸剛性関係

答変位はブレースが 28cm² 以上の断面積があれば無補強時の半分程度に低減され、それ以上あっても低減効果には大きな影響を及ぼさないことがわかる。この時の剛性比 (Kdev/Kstr) は 0.63 であった。

なお、その後の研究⁸⁾により、ブレース軸剛性 (断面積) は、ダンパーが滑り始める層間変位を補強目標変位の 1/5~1/7 以上となるように設定すれば、十分な補強効果が得られることが確認されている。

4.2 取付方法の開発⁹⁾

ダンパーブレースの既存躯体への取付方法は、定着台を PC 鋼棒で主体構造の側面に締付ける PC 鋼棒圧着接合を想定した。ダンパー補強における取付部には、十分な剛性と、ダンパーブレースから作用する繰返し荷重に対してずれが生じないことが要求される。本実験では、これらの要求性能を満たすための PC 鋼棒緊張力 (摩擦係数) および定着台の大きさ (グラウト部に掛かる支圧応力) について検討し、さらには、取付部の終局耐力と変形性能についても検討した。また、PC 鋼棒用の貫通孔が既存躯体に明けられない場合を想定して、あと施工アンカーを用いた間接接合 (以下、あと施工アンカー式) の実験も行った。あと施工アンカー式は、躯体に接着系あと施工アンカーを打ち込み、定着台の底面には頭付きスタッドを溶接しこれらをグラウトで一体化する方法である。なお、グラウト内には、収縮ひび割れ分散のためのはしご筋を配筋した。図 15 に PC 鋼棒式およびあと施工アンカー式の取付方



写真3 取付部の実験状況

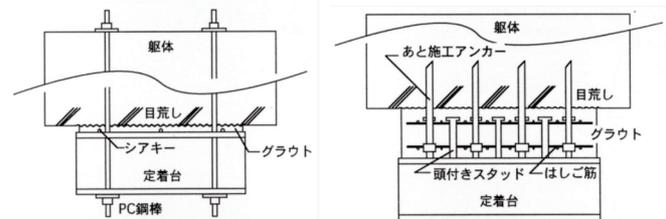
法の概念図を示す。実験はこれら 2 種類の取付方法に対し行った。写真 3 に実験状況を示す。実験で得られた水平荷重一定着台と躯体の相対変位関係の一例を図 16 に示す。加力を繰り返しても変形がほとんど進展しない荷重は、PC 鋼棒式ではグラウト面が偏心曲げにより浮き上がらない荷重とほぼ一致していること、また、グラウト面の摩擦係数は 1.0 有していることを確認した。また、あと施工アンカー式では、躯体とグラウトの肌別れが生じていない荷重と一致していた。これらの実験結果に基づき、ダンパーブレースから作用する荷重 (1.5 倍の安全率) に対し、取付部がほぼ剛域と見なせるように設計式を構築した。

4.3 フレーム実験 (補強骨組の仮動的実験)¹¹⁾

柱および柱・梁接合部のせん断耐力が不足する縮尺 1/3 の 2 層 2 スパン RC 造骨組をダンパー補強し、ダンパー補強システム全体としての補強効果を仮動的実験により確認した。

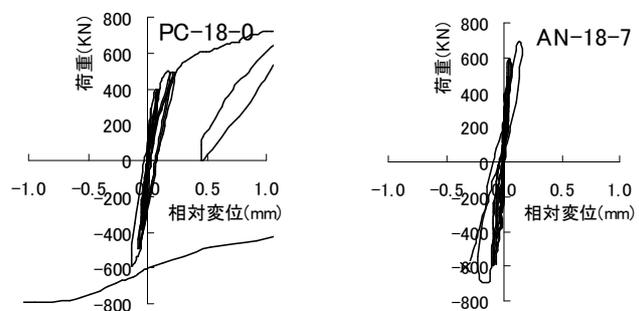
(a) 試験体および実験方法

同形状・同配筋の試験体を 2 体製作し、1 体を無補強試験体、もう 1 体をダンパー補強試験体と



(a) PC 鋼棒による圧着接合 (b) あと施工アンカーによる間接接合

図 15 定着台の取付方法



(a) PC 鋼棒による圧着接合 (b) あと施工アンカーによる間接接合

定着台の大きさ 35cm × 55cm	定着台の大きさ 35cm × 65cm
PC 鋼棒本数 15φ × 4 本	アンカー本数 8 本 (4 列 × 2 段)
PC 鋼棒緊張力 392 (98 × 4) kN	アンカー径 D19、スタッド径 19φ

図 16 水平荷重-相対変位関係

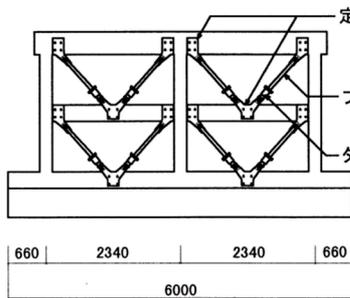


図 17 試験体形状

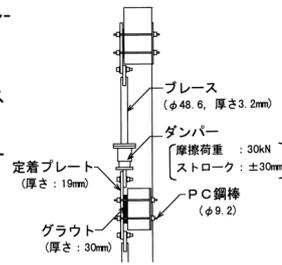


図 18 ダンパー取付詳細

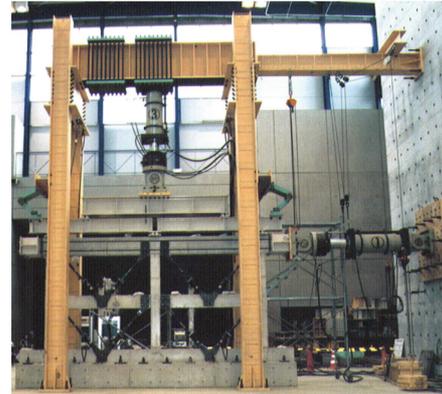


写真 4 フレーム実験状況

した。ダンパー補強試験体は、完全剛塑性型の履歴形状を示す摩擦ダンパーと鋼製ブレースが一体となったダンパーブレースを、梁端部と梁中央に取り付けた定着プレートを介して V 字形に取り付けた。試験体形状を図 17 に、ダンパーブレース取付詳細を図 18 に示す。

無補強試験体は、試験体の強度と変形性能確認のため、正負交番繰り返し加力とし、補強試験体は 1 質点系の仮動的実験により行った。入力地震動は、1940 EL CENTRO<NS>を 50kine に増幅したものを使用した。試験体への加力は、鉛直加力用アクチュエータ 1 台と水平加力用アクチュエータ 1 台を用いて行った。実験状況を写真 4 に示す。

(b) 実験結果

図 19 に応答変形角の時刻歴を示す。ダンパー補強試験体は、レベル 2 相当の入力地震動に対し、加振後 0.84sec で最大変形角 -0.63% の振幅を経験し、2.0sec~3.0sec の間で 0.3%~0.4% の振幅を記録した。最大応答変形角を経験した時点で、柱および柱・梁接合部にせん断ひび割れが発生し、2 階柱頭の主筋が一部降伏ひずみに達していたが、水平抵抗力および軸力保持能力の低下は見られず、補強目標性能を満足していることが確認された。

図 20 に応答履歴曲線を

示す。なお、実験結果をより詳細に検討するために、層せん断力をダンパーと主体構造の負担せん断力に分離し、それぞれの履歴曲線を示した。ダンパー負担せん断力による履歴曲線は、ダンパー単体の性能と同様なバイリニア形の履歴曲線を示し、最大値もダンパー単体の水平成分の総和とほぼ一致していた。また、ダンパーブレースの取付部にずれや浮き上がりの変形は見られなかった。以上のことから、ダンパー単体および取付部の性能が補強システム全体として十分に機能していたことが確認された。

主体構造負担せん断力の骨格曲線は、無補強時の骨格曲線とよい対応を示している。このことから、ダンパー補強試験体の履歴曲線が、主体構造

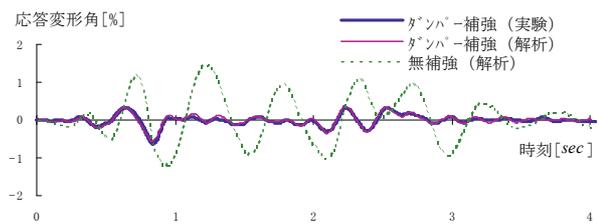


図 19 応答変形角の時刻歴

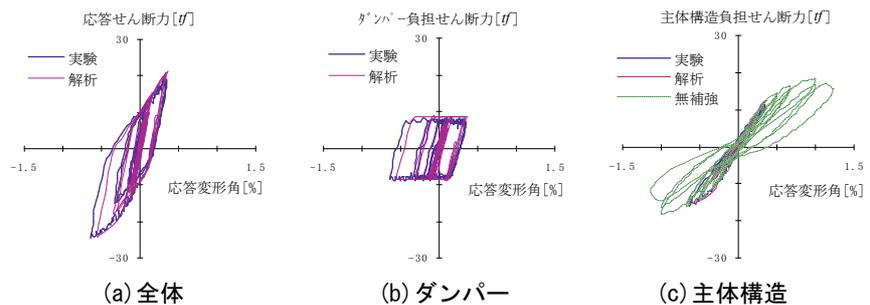


図 20 応答履歴曲線

とダンパーの履歴曲線の和で表せることがわかる。

なお、図 19、図 20 中の解析は、主体構造を想定したバネとダンパーを想定したバネが並列に結合された 1 質点並列系のモデルによる地震応答解析結果である。解析で得られた応答変形角の時

時刻歴ならびに各履歴曲線は、実験結果とよく一致しており、ダンパーを組み込んだ建物の応答が、単純な 1 質点並列系の解析によって再現可能であることが確認できる。

(c) 履歴消費エネルギーと等価粘性減衰定数

主体構造およびダンパーの消費したエネルギーを各々の履歴曲線を積分して求め、時刻歴として図 21 に示す。実験終了時の全履歴消費エネルギーに対するダンパーの消費エネルギーの割合は約 87%であり、エネルギー消費効率の低い主体構造をダンパーが補っていることがわかる。

また、図 22 に、無補強試験体とダンパー補強試験体の等価粘性減衰定数の比較を示す。無補強時の等価粘性減衰定数が 5%~14%であるのに対し、ダンパー補強試験体は小さな変形レベルから 15%~27%となっており、ダンパーのエネルギー消費が耐震性能を向上させていることが確認できる。

4.4 摩擦ダンパーの単体性能

本補強工法で用いる摩擦ダンパーが、地震終了時まで安定したエネルギー吸収性能を示すことを、種々の性能確認試験により確認した^{18), 12)}。また、数値解析により摩擦ダンパーの諸特性が説明可能であることを示した⁵⁾。ここでは、ダンパーの形状と摩擦荷重の関係、摩擦ダンパーの地震時性能と経年特性について記す。

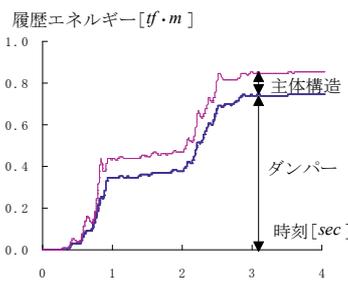


図 21 履歴消費エネルギー時刻歴

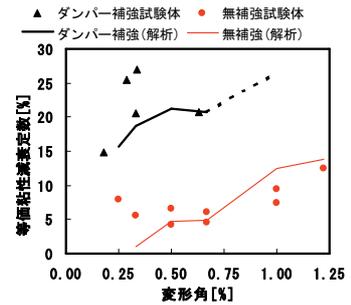


図 22 等価粘性減衰定数の推移

(a) ダンパーの形状と摩擦荷重の関係

本摩擦ダンパーは、金属系材料の引抜加工の原理を応用した機構となっており、内筒に固定されたダイスに、外筒に固定されたロッドが押し引きされることにより摩擦力を得ている。したがって、ダンパーの摩擦荷重は、ダイスの内径とロッドの外径の差により生じるダイスの締め付け力と、接触面の摩擦係数により決定される。

ダイスの締め付け力は、外圧を受ける円柱と内圧を受ける円筒の弾性理論解¹⁹⁾を用いて算定することができる。図 23 にダンパーのダイスとロッドの形状を示す。摩擦係数と面圧の関係は、10tf ダンパーの試験結果から、図 24 のような結果が得られている。

図 25 に摩擦荷重が 20、30tf のダンパーの履歴曲線を解析結果と併せて示す。解析値は実測値をやや上回っているが比較的良く推定できているといえる。

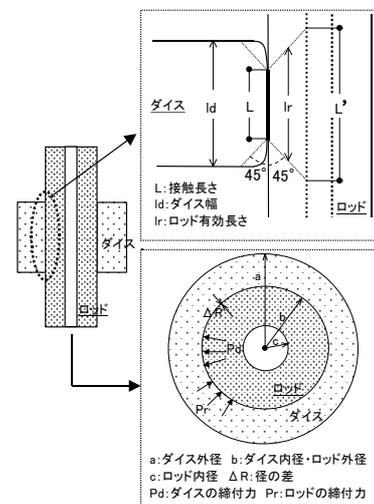


図 23 ダイスとロッドの形状

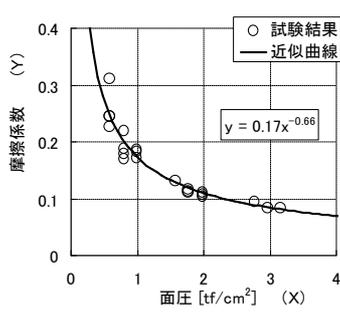


図 24 面圧と摩擦係数の関係

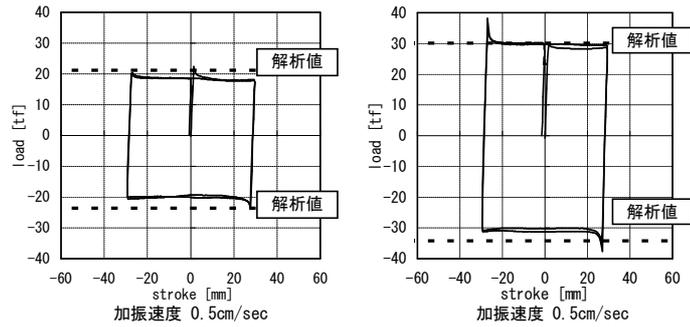


図 25 実測値と解析値の比較

(b) 地震時性能試験

地震時性能試験の試験変数は、ダンパー補強建物の地震応答解析で得られたダンパー加振速度、振幅およびエネルギー吸収量に基づき決定した。試験は、地震時の累積エネルギーを一定の速度で加振する定常加振 (V43、V65) と、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する非定常加振 (TAFT) の 2 通りとした。定常加振の試験変数を表 3 に示す。

表 3 地震時性能試験変数 (定常加振)

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

V43、TAFT 試験時のダンパー履歴曲線を図 26 に、エネルギー吸収量の時刻歴を図 27 に示す。ダンパーの履歴形状は、定常および非定常加振ともエネルギー吸収性能が良好な完全剛塑性に近い形状を示している。摩擦荷重は加振を繰り返すと若干上昇する傾向にあるがほぼ安定しており、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。

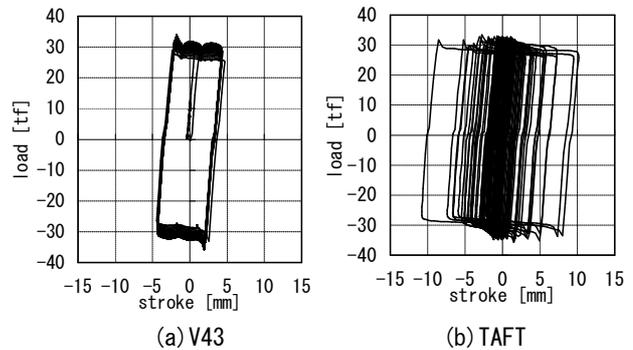


図 26 摩擦ダンパー履歴曲線

図 28 には、摩擦荷重と累積エネルギーの関係 (限界性能) を示す。レベル 2 相当の大地震動を受けたときのエネルギー吸収量の 7 倍 (約 7,000tf・cm) 吸収させても、平均摩擦荷重の低下は 1 割程度であり、摩擦ダンパーは複数回の地震入力に対しても、十分なエネルギー吸収性能を有していることが確認できる。

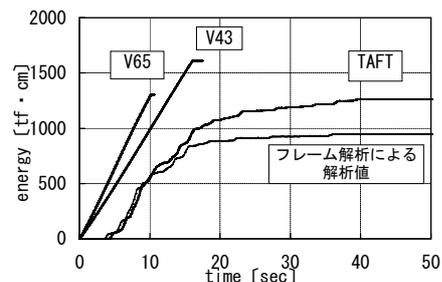


図 27 エネルギー吸収量時刻歴

(c) ダンパー温度上昇の解析

地震時性能試験時のダンパーの温度上昇について解析的に検討した。解析は、ダンパー各部を要素分割し、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た。入熱量は、ダン

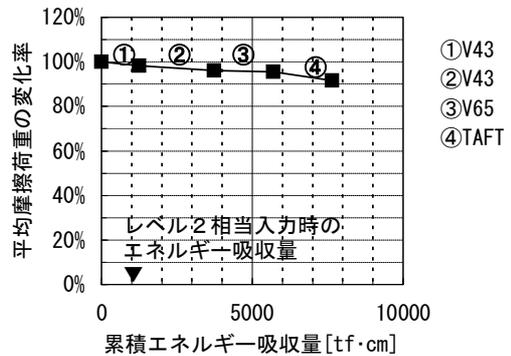
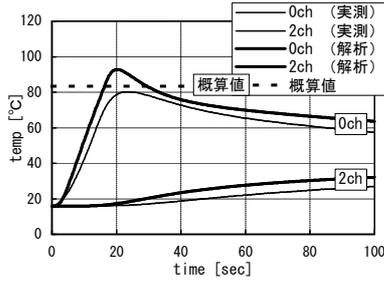
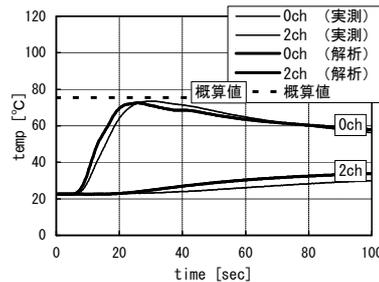


図 28 ダンパーの限界性能



(a) V43



(b) TAFT

図 29 温度時刻歴

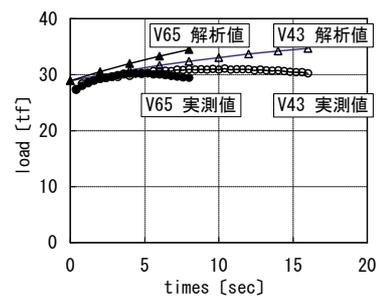


図 30 摩擦荷重上昇

パーの履歴エネルギーが全て摩擦熱に変換されると仮定して、摩擦面の要素に与えた。解析手法の詳細は、文献(5)を参照されたい。

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 29 に示す。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よく一致しており、ダンパー温度上昇の状況が、本解析手法により再現できることがわかる。また、図中の概算値は、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上昇温度である。概算によっても、概ね実測値を捉えていることがわかる。

(d) 温度上昇による摩擦荷重の解析

地震時性能試験時の摩擦荷重は、摩擦熱によりロッドが膨張し、ダイスによる締付力が上昇するため若干上昇する。このことを解析的に検討するため、摩擦熱によるダイスとロッドの温度応力解析を行った。即ち、摩擦面に生じる締付力の上昇を、ダイス、ロッドの温度上昇の解析結果を用いて、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。解析は定常加振 V43、V65 について行い、摩擦係数は 0.1 として計算した。図 30 に摩擦荷重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。解析値は荷重の上昇域における実測値をよく追跡できていることがわかる。

(e) 経年特性確認試験

ダンパーの経年特性を確認するため、10tf ダンパー 2 体(ロッドが中実、中空のもの)を用いて、腐食促進試験を行った。試験は塩水シャワー試験機を用いた複合サイクル試験とし、サイクル条件は JIS K 5621 に規定されている試験方法に準拠した。複合サイクル条件を図 31 に示す。既往の研究結果^{20), 21)}では、複合サイクル試験が約 80 サイクル経過すると、東京およびつくばでの暴露試験約 1 年に相当するとされている。本試験では、複合サイクル数が 80、240、400、800 サイクルに達したときに荷重確認試験を行い、10 年相当の経年特性を調べた(試験期間：200 日)。

図 32 に経年特性確認試験時のダンパー履歴曲線を、図 33 に平均摩擦荷重の変化を示す。履歴曲線の形状は、試験開始後 800 サイクルまでは

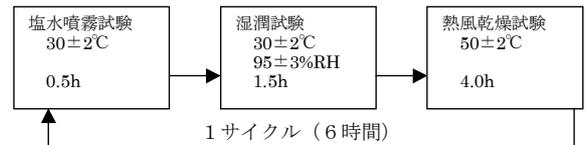
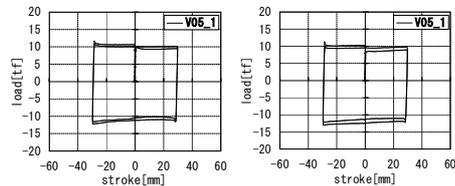
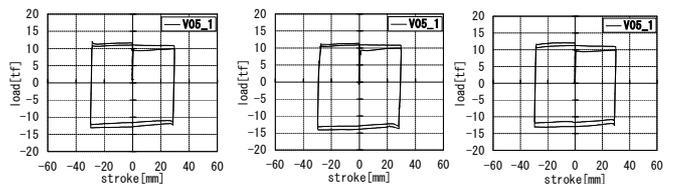


図 31 複合サイクル試験条件



(a) 試験前

(b) 80 サイクル後



(c) 240 サイクル後

(d) 400 サイクル後

(e) 800 サイクル後

図 32 履歴曲線の変化(ロッド：中実)

とんど変化せずほぼ剛塑性型を維持している。平均摩擦荷重は試験開始後上昇するが、試験前に対する上昇割合は最大で約 14%であった。この程度の摩擦荷重の上昇は許容し得る範囲であり、本摩擦ダンパーが著しく経年劣化しないことが確認された。

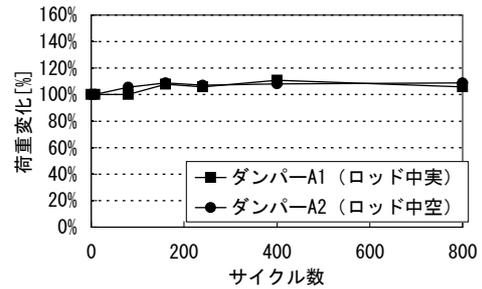


図 33 平均摩擦荷重の変化

4.5 補強設計方法の開発

本節では、制震補強建物の補強効果を、耐震診断基準の構造耐震指標 (Is) で評価する方法^{13)・8)}について概説する。本手法を用いることにより、地震応答解析による詳細検討に入る前に、大まかな補強部材量が算定でき、概算補強検討が可能となる。補強設計フローを図 34 に示す。

まず、制震補強建物の Is 指標は、耐震診断基準と同様に(6)式により算定する。

$$I_S = E_0 \times S_D \times T \quad (6)$$

以後、補強後の記号を区別するため、Is を RI_S、E₀ を RE₀ とする。

制震補強建物の保有性能基本指標 (RE₀) は、耐震診断基準の考え方にに基づき Newmark のエネルギー一定則 (図 35) を適用し誘導した(7)式により算定できるものと仮定する。

$$RE_0 = C_{Ystr} \times \sqrt{\phi^2(2\mu - 1) + 2B \cdot \alpha_c \left(\mu - \frac{1}{\mu_{dev}} \right)} \quad (7)$$

ここで、C_{Ystr} は既存架構の降伏強度 (=

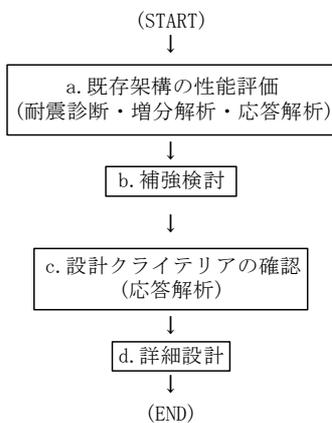


図 34 制震補強設計のフロー

Q_{Ystr}/ΣW)、φ は 1/(0.75(1 + 0.05μ))、μ は既存架構の許容塑性率、α_c はダンパー強度比でダンパー降伏強度 C_{Ydev} と C_{Ystr} の比 (= C_{Ydev}/C_{Ystr})、μ_{dev} は既存架構の降伏変位に対するダンパー塑性率 (=δ_{Ystr}/δ_{Ydev})、B はダンパーエネルギー消費効率 (=8) である。

また、補強後の RE₀ と補強前 (無補強時) の保有性能基本指標 E₀ の比は、(8)式で表される。

$$n = RE_0 / E_0 = \sqrt{1 + \frac{2B \cdot \alpha_c \left(\mu - \frac{1}{\mu_{dev}} \right)}{\phi^2(2\mu - 1)}} \quad (8)$$

したがって、補強目標 RE₀ を定めれば、補強建物の 1 層で必要とされるダンパー降伏強度は、(8)を変形した(9)式により算定することができる。

$$Q_{dev} = \frac{\left((RE_0 / E_0)^2 - 1 \right) \cdot \phi^2 \cdot (2\mu - 1) \cdot \mu_{dev}}{2B \times (\mu \cdot \mu_{dev} - 1)} \times Q_{ystr} \quad (9)$$

なお、必要なダンパー降伏強度を算定する際、ダンパー塑性率 μ_{dev} を設定しておく必要がある。

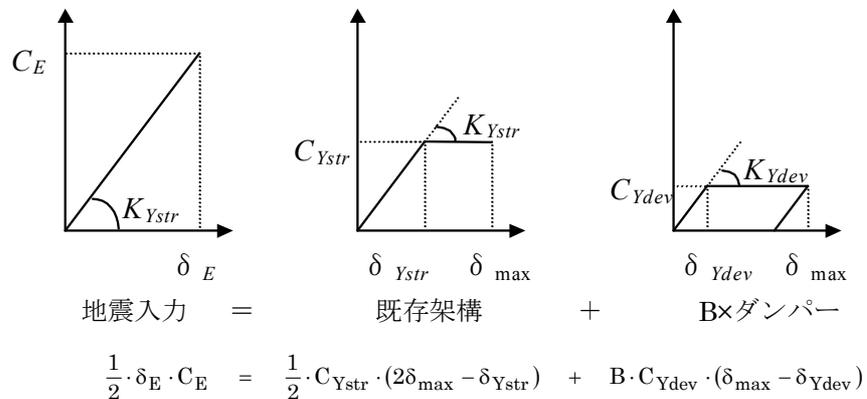


図 35 制震補強建物のエネルギー一定則

μ_{dev} は、補強目標層間変形の何分の1の変形から、ダンパーを効かせ始めるか（摩擦ダンパーを滑らすか）設定するパラメータで、これまでのケーススタディ結果から、 $\mu_{dev}=7$ と設定することになっている。すなわち、補強目標層間変形の1/7の層間変形で、摩擦ダンパーを滑らすように設定している。上層階のダンパー降伏強度は、高さ方向のダンパー降伏せん断力係数が A_i 分布に沿うように決定する。

各層のダンパー降伏強度が決定されたら、ブレースの取付角度（約 45° ）と1本当たりのダンパー強度（30tf）より、必要補強量（補強スパン数）が算出できる。

ダンパー取付部材のブレースは、ダンパー塑性率 μ_{dev} が設定されていることより、1本当たりのダンパー強度と取付角度から、必要軸剛性が決定される。この時、ダンパー単体の剛性と取付部の剛性も考慮する。ブレース断面積は、必要軸剛性とブレース長さから決定される。

上記の方法により、補強量を算定し、質点系の地震応答解析により補強効果を確認したケーススタディ結果¹⁴⁾を図36に示す。本ケーススタディは、実在する4件の4階建てRC造建物を対象に行ったもので、補強目標の RE_0 は、レベル2（50kine）相当の入力に対し補強目標層間変形角が1/250以内に収まるよう $RE_0=0.75$ に設定している。詳細は文献(14)を参照されたい。図36より、概算検討で算出された補強部材量で補強された建物の応答値が、補強目標層間変形角の1/250以内に概ね収まっていることが確認できる。

一方、制震ブレースを小さな変形で塑性化する鉄骨ブレース（座屈せず安定した履歴特性を有するブレース）と見

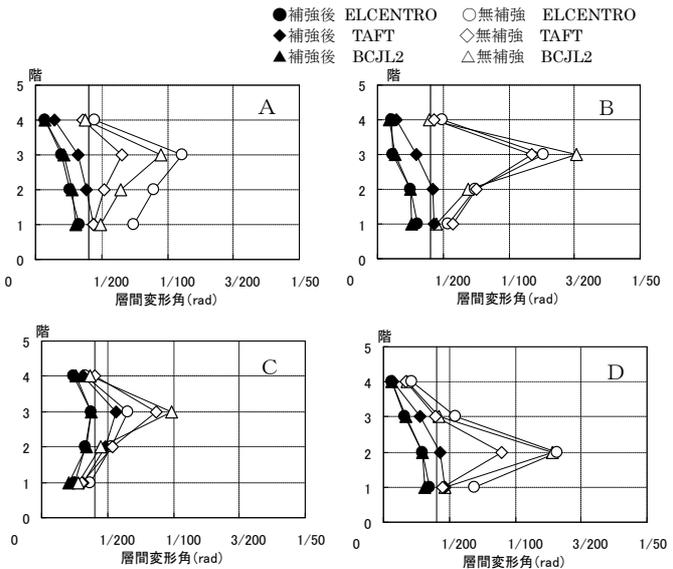


図36 応答解析による概算検討結果の適合性の確認

なして、ブレースの $C \times F$ を単純に既存架構の $C \times F$ に加算した RE_0 算定式を(10)式に示す。ダンパー強度比 α_c （既存架構の降伏強度とダンパー降伏強度の比）が0.4以下の範囲では、(7)式により算定した RE_0 値と(10)式で算定した RE_0 値との間には、優位な差が無いことが確認されており⁸⁾、より簡便な(10)式により、概算補強検討および補強効果が評価できる。

$$RE_0 = C_{Ystr} \times \sqrt{\phi^2(2\mu - 1) + C_{Ydev} \times \sqrt{(2\mu \cdot \mu_{dev} - 1)}} \quad (10)$$

4.6 実在建物での制震補強効果の確認実験

解体予定の実在校舎を利用して、制震補強効果を確認する現場実験を実施した^{15), 16)}。実験は、



写真5 実験が行われた校舎の全景と実験状況

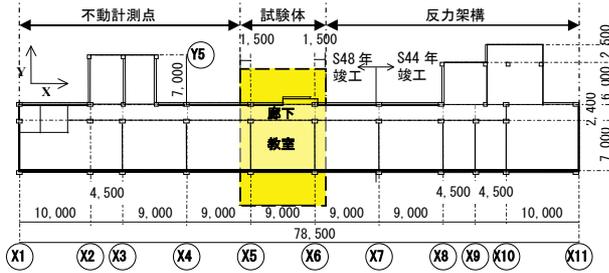


図 37 実験対象建物の平面図

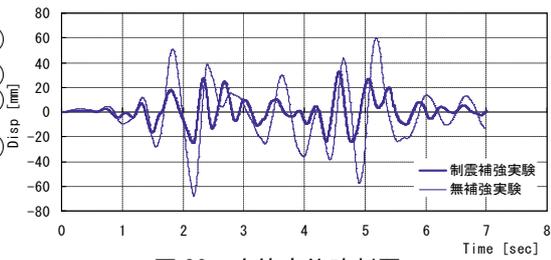


図 38 応答変位時刻歴

耐震診断・耐震補強設計上有益なデータを取得することを目的に、(社)埼玉建築設計監理協会内に設置された浦和市立某小学校実大耐震実験研究会(会長:工学院大学広沢雅也名誉教授)により計画されたもので、工学院大学と日本大学の2つのグループにより各々異なる実験が行われた。制震補強効果の確認実験は、その一項目として、日大グループ(主査:日本大学安達洋名誉教授)で実施したものである。

(a) 実験概要

実験は、解体予定のRC造3階建ての既存校舎を使って行われた(写真5)。図37に示す平面図のように、校舎の桁行き方向を3分割に縁切りし、中央の3層1×2スパン部分を試験体として使用した。実験は、試験体南側(Y1通り)外壁面に、制震ブレースを取り付け、制震補強時の仮動的実験を行い、ブレース撤去後に再度、同じ入力を与えた仮動的実験を行った。仮動的実験は、頂部集中加力の1質点系の手法により実施した。入力地震動は、1940EL CENTRO<NS>成分を65kineレベルに増幅して使用した。なお、補強工事は実際の工事と同じように、サッシュや内装材を存置したままで行い、実験中にはそれらの損傷状態を観察した。

(b) 実験結果

制震補強時と無補強時の実験で得られた応答変位の時刻歴を図38に、頂部荷重-頂部変位関係を図39に、最終ひび割れ状況(0.3mm以上)を図40に示す。また、各階の最大応答変位と最大層間変形角を図41に、2階の層せん断力-層

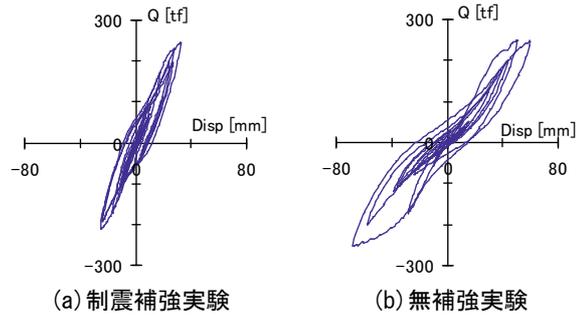


図 39 頂部荷重-頂部変位関係

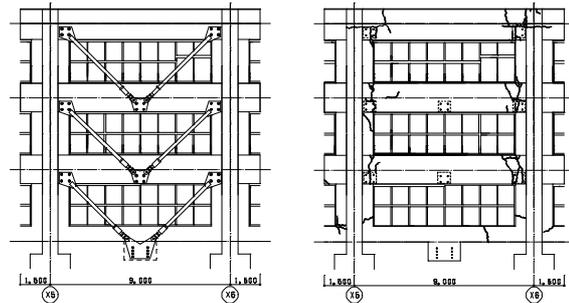


図 40 最終ひび割れ状況

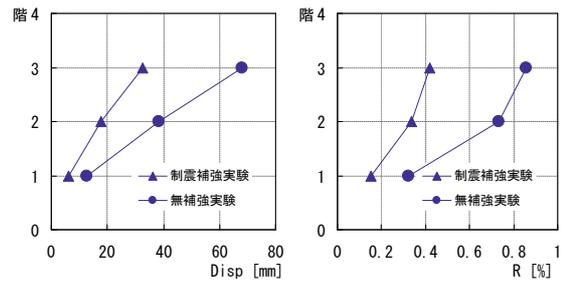


図 41 最大応答値

間変位関係を図42に示す。制震ブレースの負担せん断力は、ブレースに貼付した歪みゲージの値から求めたものである。

制震補強時の最大応答値は、無補強時の半分以下に低減され、最大層間変形角もほぼ1/250以下に収まっていることが確認された。また、制震補強時のひび割れ状況も、ほぼ無被害に近い状況で、

制震ブレース取付部にも、ずれなどの変形は見られず、ダンパー単体の性能が十分に発揮されていたことが確認された。図 42(b)には、補強時と無補強時に主体構造が経験した履歴の違いが表されている。

以上の実験結果より、実構造物にダンパーを取り付けた場合においても、制震ブレースは補強設計時に想定した通りに作動し、期待した制震効果が得られることが確認された。

5. おわりに

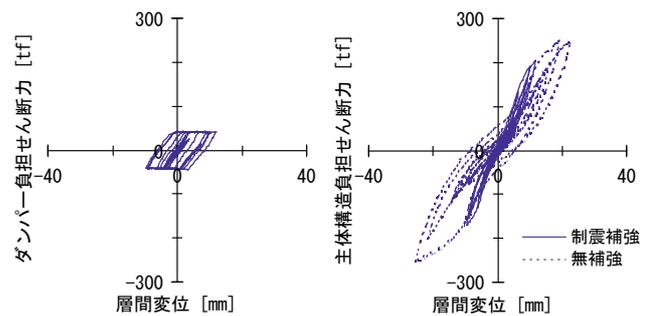
以上、制震ブレースを用いた耐震補強工法の概要と、研究開発の概要および内容について記した。

耐震補強が必要な既存不適格建物の数は膨大であり、より早く多くの建物を補強するためには、居ながら補強が可能な補強法の普及が必要である。本補強法は、その一例に過ぎないが、制震補強法は、居ながら補強を可能とする一つの有効な方法ではないかと考える。今後、広く制震補強法が普及していくためには、補強効果の評価法や設計法が確立され、一般の構造設計者が容易に採用できるように設計資料を整備していく必要がある。また、ダンパーの取付部材や既存架構との取り合い部には、ダンパー単体の性能を確実に発揮させるための剛性確保が重要となり、それらの設計資料の蓄積も必要と考える。

最後に、本論文は既発表論文から抜粋して研究結果の紹介を主眼にまとめ直したものであり、解析仮定や実験諸元など詳細な研究内容を割愛させて頂いた。詳細な研究内容については、参考文献を参照して頂けたら幸いである。

【参考文献】

- 1) 広沢雅也：診断結果から適切な改修設計を導く考え方, AIJ 関東支部シンポジウム「耐震診断・耐震補強の現状と課題」, pp.43-54, 2000.1.14
- 2) 北嶋圭二、安達洋ほか：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 1~その 21), AIJ 大会 C-2, 1996~1999



(a) ダンパー負担せん断力 (b) 主体構造負担せん断力

図 42 ダンパー及び主体構造の履歴曲線 (2 層)

- 3) 野口, 北嶋, 上田, 安達：耐震補強のためのダンパーブレースの躯体定着方法に関する実験, JCI 年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.345-350, 1997.6
- 4) 千葉寿彦ほか：関東 A 県下における学校校舎の耐震性能(その 20. 制震補強構法による補強検討結果-2), AIJ 大会 C-2, pp.201-202, 1999.9
- 5) 大西, 北嶋, 中西, 安達：既存 RC 造建物の制震補強用摩擦ダンパーに関する研究, JCI 年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.385-390, 1999.6
- 6) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート建築物の耐震改修設計指針・同解説, 1990
- 7) 日本建築学会：動的外乱に対する設計の展望, 1996
- 8) 松本, 北嶋, 中西, 安達：摩擦ダンパーを用いた既存鉄筋コンクリート造建物の耐震補強設計に関する研究, JCI 年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.391-396, 1999.6
- 9) 北嶋ほか：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 1~その 5), AIJ 大会 C-2, pp.271-280, 1996.9
- 10) 北嶋, 野口, 上田, 中西, 安達：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(JCI), pp.283-292, 1997.4
- 11) 北嶋, 上田, 中西, 安達：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, JCI 年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.339-344, 1997.6
- 12) 上田ほか：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 16.摩擦ダンパーの地

震時性能の検討), (その 17. 摩擦ダンパーの荷重と形状の関係および経年特性), 日本建築学会大会 C-2, pp.145-148, 1999.9

13) 北嶋, 上田, 緒方, 中西, 安達: 摩擦ダンパーを用いた制震レトロフィット技術の研究・開発, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, 耐震改修 STS, Vol.1, STS4-7, pp.189-194, 1998.11

14) 稲垣真一ほか: 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 20. 実在建物を対象とした概算補強検討法の適合性の確認), AIJ 大会 C-2, pp.153-154, 1999

15) 安達洋ほか: 制震補強された既存校舎の実大耐震実験(その 1~7), 平成 11 年度日本大学理工学部学術講演会論文集, pp.82-95, 1999.11

16) 木村, 北嶋, 中西, 安達: 制震補強された既存校舎の実大耐震実験, JCI 年次論文報告集, Vol.22, No.3, 2000

17) 日本建築学会: 「免震構造設計指針」5 章 構造設

計 (5.4.2 エネルギーの釣合いに基づく第 1 層の応答予測), pp.85-96, 設計資料編 第 4 項 構造設計 (4.1.2 エネルギー論による応答特性の評価), pp.436-439, 1993

18) 上田ほか: 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), AIJ 大会 C-2, pp.167-168, 1998.9

19) 日本機械学会: 機械工学便覧, A4 材料力学

20) 藤原博, 田原芳雄: 鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.570, pp.129-140, 1997.7

21) 西田和生, 檜野紀元: 金属外装材の耐久性試験 その 5. 紫外線を伴った塩乾湿サイクル試験の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.893-894, 1996.6