

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	速度依存型ダンパーをもつ制振構造のせん断棒モデル化について
Title(English)	SHEAR BEAM MODEL OF A PASSIVE CONTROL STRUCTURE WITH VELOCITY-DEPENDENT DAMPERS
著者(和文)	笠井和彦, 城臺顕, 佐藤大樹
Authors(English)	KAZUHIKO KASAI, Daiki Sato
出典(和文)	
Citation(English)	
発行日 / Pub. date	2002, 12

速度依存型ダンパーをもつ制振構造のせん断棒モデル化について

SHEAR BEAM MODEL OF A PASSIVE CONTROL STRUCTURE WITH VELOCITY-DEPENDENT DAMPERS

笠井和彦*, 城台顕**, 佐藤大樹***

Kazuhiko KASAI, Akira JODAI, and Daiki SATO

For the dynamic time-history analysis of a passively controlled building, a shear beam model having a small degree of freedom is typically used in Japan. This paper proposes such a modeling method for the building with velocity-dependent dampers. The method is based on static analyses of the frame without the dampers, and it predicts the lateral stiffness and damping coefficient at each story level where dampers are installed. Using this method, a shear beam model is created from an example 10-story building consisting of three parallel frames, each of which has 6 bays and 20 dampers. The damper is assumed to be a viscoelastic damper with a brace or stud type configuration. Time-history analysis results for the shear beam model are found to match very well with those for the member-to-member model that has considerably larger degree of freedom.

Keywords: shear beam model, member-to-member model, viscoelastic damper, brace type, stud type
せん断棒モデル、部材構成モデル、粘弾性ダンパー、ブレース型、間柱型

1. はじめに

1.1 ブレース型以外の制振構造の特徴と問題点

速度依存ダンパーを用いた制振構造物の設計が、近年盛んになってきている。ダンパーの設置方法として主たるものはブレース型(図1)であるが、開口部の確保やその他の設計上の制約から間柱型、シアリンク型、方杖型、はさみ型、トグル型、水平型(図2)などの様々な種類の構造を用いた例が増加している。

ダンパーは力と変形に位相ずれを起こし、減衰を生じる部材である。そこで、ダンパーをもつ制振構造の時刻歴解析には力の伝達と変形の位相差を正確に再現した手法が望ましい。つまり個々の部材によって構成されるモデル(以後、部材構成モデルと呼ぶ)が良いが、自由度が大きくなるため、解析作業や迅速な性能把握といった点で、困難が伴うことが多い。そこで実務では、せん断棒、曲げせん断棒などによる簡素なモデル化が試みられているが、現状では恣意的なパラメータの設定をするなど、理論的な整合性を取りにくいモデル化がなされることが多く、そのために精度の評価についても一般的に論じることが難しいのが現状である。

この主たる理由は、簡素なモデル化に必要となる情報、つまり、各層の等価せん断剛性や等価粘性の把握法が確

立されていないためである。ブレース型においては、比較的容易に性能を把握することが可能ではあるが、他の制振構造においては困難を伴う。

ブレース型構造の水平剛性は、図1(b)のごとくダンパー・ブレース直列結合体の剛性とフレームの剛性の和で

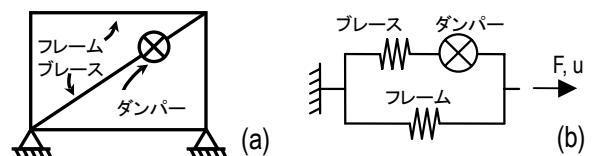


図1 ブレース型制振構造とそのメカニズム (Brace Type and Corresponding Mechanism)

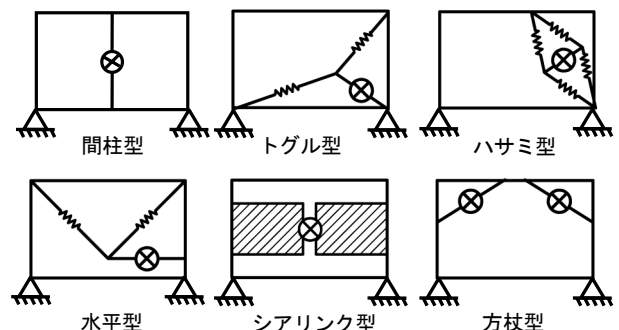


図2 様々な形式のシステム (Various Types of Passive Control Systems)

* 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D
** 鹿島建設原子力部
*** 東京工業大学人間環境システム大学院生

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology
Kajima Construction Company
Grad. Student, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

あり¹⁾³⁾、これに即し減衰定数も簡易に求まる。これと対比し、その他の構造 (図2)では、フレームの変形モードがダンパーとフレームの相対硬さに依存し、また、ダンパーが梁、柱の曲げ・せん断抵抗により支持されるため、ブレース型構造のような単純な構成材間の関係(図1b)は存在しない。そのため、他の制振構造の剛性や減衰の評価には、別法が必要となる。

さらに、ブレース型構造では、梁や柱のせん断力・曲げモーメントがダンパー力と独立して変位に比例するが、その他の構造では変位と異位相のダンパー力が伝達されるため、より複雑な傾向を示す。この部材力について、時刻歴解析によらない簡易な評価法を創出することも、制振構造の理解や設計にとって重要と思われる。

以上の観点から筆者らは、ブレース型と異なる構造として最近よく用いられる間柱型 (図2左上)を例にとり、線形な速度依存ダンパーをもつ一質点系構造の動的特性と部材力の簡易かつ厳密な評価法を提案した (文献4)。

1. 2 本論文の目的と構成

本論文の目的は、一質点制振構造の動的特性評価法(上述)を多質点構造に拡張するするとともに、簡易な時刻歴解析のためのせん断棒モデル化を提案することである。上記の複雑な挙動をする構造形式の中でも、間柱型を例にとり、ブレース型と比較しながら論じていく。速度依存ダンパーとして粘弾性ダンパーを用いた場合を考慮するが、他の線形な速度依存ダンパーにも適用可能である。

2章では、一質点制振構造の動的特性と、簡易な静的解析による動的特性の厳密解の導出について、文献4に記した理論の概要を述べる。3章ではこの理論に基づき、多質点系構造物への適用方法を述べ、振動数に依存するダンパーを用いた場合の評価法、設計法について述べる。4章では10層のフレームモデルと、評価式を用いて設計したせん断棒モデルとの比較を行い、この評価法、設計法の正確性について論じる。

2. システム動的特性、厳密評価法の概要

2. 1 粘弾性ダンパーの動的特性

粘弾性ダンパーに用いられる材料は、アクリル系、ジェン系、イソブチレン系といった多くの種類があるが、ここでは、文献5で用いられているアクリル系粘弾性体の振動数依存モデルを用いる。これらの式は少なくとも0.01Hz~300Hzにおいて精確であることが分かっており(文献5)、本論においてはこの解を厳密解として扱うこととする。この粘弾性体の特性は以下のとおりである。

温度・振動数の等価性にに基づき、任意の温度 θ (°C)および円振動数 ω (rad/s)におけるアクリル系粘弾性体の材料特性は、以下に定義する等価円振動数 ω_{eq} を用いて、統一的に表すことができる(文献5)。

$$\omega_{eq} = \omega \cdot \exp[-14(\theta-20)/(\theta+77)] \quad (1)$$

式(1)右辺の ω の係数は、温度・時間換算因子またはシフトファクターと呼ばれ、粘弾性体の剛性などの、温度による変化と振動数による変化が、等価なことを表す。例えば、10°C, 0.6Hz ($\omega = 1.2\pi$ rad/s)のときの特性は、20°C, 3Hz (6π rad/s)のときの特性と等しいことは、式(1)より両者とも ω_{eq} が等しいことから説明できる。このように、ダンパー貯蔵剛性 K'_d 、損失剛性 K''_d 、損失係数 η_d (2.3節参照)は、等価振動数 ω_{eq} (式(1))の関数として表され、

$$K'_d(\omega_{eq}) = G \frac{1 + ab\omega_{eq}^{2\alpha} + (a+b)\omega_{eq}^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega_{eq}^{2\alpha} + 2a\omega_{eq}^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_s}{d} \quad (2a)$$

$$\eta_d(\omega_{eq}) = \frac{(-a+b)\omega_{eq}^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega_{eq}^{2\alpha} + (a+b)\omega_{eq}^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (2b)$$

$$K''_d(\omega_{eq}) = \eta_d(\omega_{eq}) K'_d(\omega_{eq}) \quad (2c)$$

となる。ここに、 $A_s, d =$ 粘弾性体のせん断総面積と厚さである。本論で用いた振動数・温度・振幅の範囲では粘弾性体がほぼ線形性を保つため、式(2)に $G, a, b, \alpha = 0.40\text{kgf/cm}^2, 5.6 \times 10^{-5}, 2.10, 0.558$ を用いればよい⁵⁾。以上より、与えられた温度 θ と振動数 ω を式(1)に代入し ω_{eq} を求め、それを式(2)に代入すれば K'_d, η_d が求められる。

なお、 K'_d と K''_d は、それぞれ最大変位(ゼロ速度)発生時、最大速度(ゼロ変位)発生時のダンパー力、すなわち最大弾性力と最大粘性力の、最大変形に対する比である。 K'_d は弾性力を求める等価な剛性であり、 K''_d は粘性係数 C_d に対し $K''_d = C_d \omega$ の関係がある。また、 $\eta_d (=K''_d/K'_d)$ は最大粘性力と最大弾性力の比である。

2. 2 ダンパーの2状態に基づく動的特性評価

システムとダンパーの水平力 F, F_d および水平変形 u, u_d を図3で定義する。また、これらの最大値には、添え字“max”を用いて示すことにする。

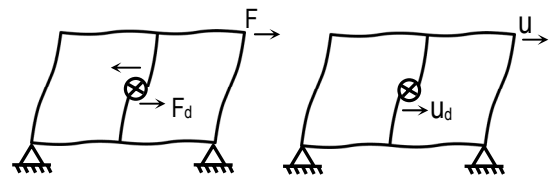


図3 荷重および変形の定義
(Definition of Applied Load and Deformation)

間柱型では、ダンパーとつながる間柱、梁、柱の曲げ変形が顕著なため、ダンパー変形 u_d がフレームの層間変形と著しく異なる場合が多い。これは支持材変形が概して少ないブレース型構造と対照的な傾向であり、そのため間柱型の減衰はブレース型のそれと比較して一般的に小さくなる。図4に示されるように、ダンパーの履歴曲

線に対してフレームの履歴曲線が著しく細くなることから明らかである。

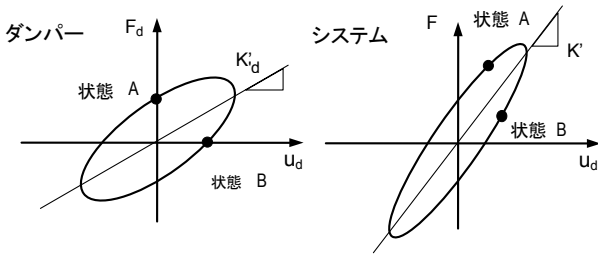


図4 楕円履歴上における状態 A, B の位置 (Positions of States A and B on Hysteresis Loop)

この制振構造の動的特性として、貯蔵剛性 K' 、損失剛性 K'' 、損失係数 η を定義する¹⁾⁻³⁾。粘弾性ダンパー(2.1節)と同様に、図4のシステム履歴において、 K' および K'' は、それぞれ最大変位(ゼロ速度)発生時、最大速度(ゼロ変位)発生時の力と最大変位の比である。 K' は弾性力を求める等価な剛性であり、 K'' は粘性係数 C に対し $K''=C\omega$ の関係がある。また、 $\eta (=K''/K')$ は最大粘性力と最大弾性力の比であり、等価減衰定数 h_{eq} に対し、 $h_{eq}=\eta/2$ の関係がある(この式の注意として、文献2,3を参照のこと)。

なお、 K' 、 K'' は与えられた円振動数 ω のもと、次の関係をもつ。

$$u(t)=u_{max}\sin(\omega t+\varphi), \quad F(t)=F_{max}\sin(\omega t+\varphi+\delta) \quad (3a,b)$$

$$K'=\frac{F_{max}}{u_{max}}\cos\delta, \quad K''=\frac{F_{max}}{u_{max}}\sin\delta, \quad \eta=\frac{K''}{K'}=\tan\delta \quad (4a-c)$$

ここに δ はシステムの変位と荷重間の位相差である。さらに K' 、 K'' は、システムの楕円履歴曲線の傾きと太さをそれぞれ定義するものであり、曲線の式は以下の如くなる。

$$F=K'u \pm K''\sqrt{u_{max}^2-u^2} \quad (5)$$

式(1)、(2)と同様にダンパーにおいても以下の関係がある。

$$u_d(t)=u_{d,max}\sin\omega t, \quad F_d(t)=F_{d,max}\sin(\omega t+\delta_d) \quad (6a,b)$$

$$K'_d=\frac{F_{d,max}}{u_{d,max}}\cos\delta_d, \quad K''_d=\frac{F_{d,max}}{u_{d,max}}\sin\delta_d, \quad \eta_d=\frac{K''_d}{K'_d}=\tan\delta_d \quad (7a-c)$$

ここに δ_d はシステムの変位と荷重間の位相差である。さらに K'_d 、 K''_d は、ダンパーの楕円履歴曲線の傾きと太さをそれぞれ定義するものであり、曲線の式は以下の如くなる。

$$F_d=K'_d u_d \pm K''_d \sqrt{u_{d,max}^2-u_d^2} \quad (8)$$

間柱型の場合にはシステムとダンパーの変形の間位相差があり、それがブレース型よりも顕著なことが、特徴である。図4における状態Aは、ダンパー変形 $u_d(t)=0$

のときであり、時刻 $t=0$ である。一方、状態Bはダンパー力 $F_d(t)=0$ のときであり、 $t=(\pi-\delta_d)/\omega$ である。状態Aのシステム変形と荷重を u_{dA} 、 F_{dA} および状態Bのダンパー変形と荷重を u_{dB} 、 F_{dB} とすると、式(3)より

$$u_A=u_{max}\sin\varphi, \quad F_A=F_{max}\sin(\varphi+\delta) \quad (9a,b)$$

$$u_B=u_{max}\sin(-\varphi+\delta_d), \quad F_B=F_{max}\sin(-\varphi-\delta+\delta_d) \quad (10a,b)$$

また、状態A、Bにおけるシステムの変形と力をそれぞれ u_A 、 F_A 、および u_B 、 F_B とすると、式(6)より

$$u_{dA}=0, \quad F_{dA}=F_{d,max}\sin\delta_d \quad (11a,b)$$

$$u_{dB}=u_{d,max}\sin\delta_d, \quad F_{dB}=0 \quad (12a,b)$$

式(3)～式(12)より、次式が求まる(文献4)。

$$K'=\frac{F_A}{u_A}-\frac{K''}{\tan\varphi}, \quad K''=\left(\frac{F_A}{u_A}-\frac{F_B}{u_B}\right)\left\{\frac{1-(\tan\varphi)/\eta_d}{\tan\varphi+(1/\tan\varphi)}\right\}$$

$$\tan\varphi=\frac{\eta_d}{1+(u_B/u_A)\sqrt{1+\eta_d^2}} \quad (13a-c)$$

2. 3 静的解析によるシステムの動的特性評価

式(13)は、与えられた間柱型制振構造の K' 、 K'' が、状態A、Bそれぞれにおけるシステム力や変形の比で表されることを示している。これらの比が、動的解析を用いることなく単純な静的解析によっても厳密に求められることを、説明する。

図5より、定常応答をしているシステムは、ダンパー状態がA、Bの場合には、それぞれダンパーをピン($u_{dA}=0$)に置換したものと、ダンパーを非拘束部($F_{dB}=0$)に置換したもので表されることが、容易に理解できる(図5)。そこで、これらの置換を施したシステムの静的解析を行えば、状態A、Bの解を求めることができる。線形性のため、システム外力の大きさは任意で良いが、ただし、ダンパー力・変形が図4の共通なダンパー履歴上の点A、Bに定まるよう、外力 F_A と F_B の比を選ぶ必要がある。

これらをふまえ、以下に静的解析の手順を説明する(図5)。状態Aを表すシステムに任意力 F_A を与え、システム変形 u_A 、ピン部水平せん断力 F_{dA} を求める。次に状態Bを表すシステムにも任意力 F'_B (例えば F_A と同値)を用い、システム変形 u'_B と2自由端の相対変位 u'_{dB} を求める。ただし式自由端が本来とるべき変位は(文献4)、

$$u_{dB}=F_{dA}/\sqrt{(K'_d)^2+(K''_d)^2} \quad (14)$$

であるため、システムの線形性に基づき

$$u_B=u'_B \cdot (u_{dB}/u'_{dB}), \quad F_B=F'_B \cdot (u_{dB}/u'_{dB}) \quad (15a, b)$$

以上、求めた F_A 、 u_A および F_B 、 u_B を式(13)に代入し、制振構造全体の動的特性、すなわち貯蔵剛性 K' 、損失剛性

K'' , 損失係数 $\eta (=K''/K')$ を得ることができる。この作業は、言いかえると、力・変形を示すグラフ(図 4)において、状態 A, B を表す点の座標を静的解析から求め、それらの点を通る楕円曲線の式を理論的に算定している。さらに、この結果によりシステムをバネと粘性要素の並列体に置換できる。すなわち、2.2 節で述べたように、バネ定数 K' , 粘性係数 $C (=K''/\omega)$ である。要約すると以下のとおりとなる(図 5)。

システムの動的特性、およびバネ定数・粘性係数の算定法として、

- (a) ダンパーをピンとした骨組みに任意力 F_A を与え、 u_A, F_{dA} を得る。
- (b) ダンパー無しで、任意力 F_B を与え、 u'_B, u'_{dB} を得る。
- (c) F_B, u_B を求め(式(12))、システム K', K'' を得る(式(10))。
- (d) バネ定数 K' , 粘性係数 $C = K''/\omega$ をもつせん断棒モデルを作成する。

なお、ダンパーサイズが既知であるが、 ω が未定のため K'_d, K''_d が不明な場合(式(21))は、簡便な収斂計算で、それらを解くことができる(3.5 節)。

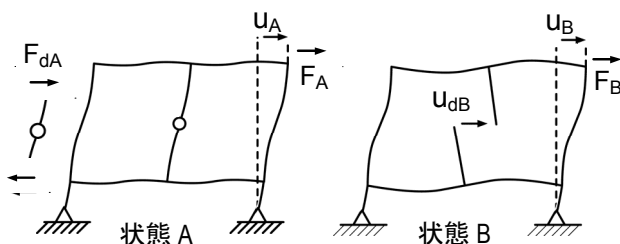


図 5 状態 A, B を再現するようなフレーム外力 F_A, F_B (Applied Loads to Generate States A and B)

2. 4 静的解析法の拡張例

上述の方法に関して、以下の拡張例が考えられる。任意の F_A と F'_B から得た u_A, u'_B は、ダンパーの影響を含まず、骨組み部材のみで決まる不変量であり、これらと、変数 K'_d, K''_d を、式(13), (14), (15) に代入すれば、システム特性 K', K'' が、 K'_d, K''_d の連続関数として容易にプロットできる。つまり与えられたフレームに対し 2 つの静的解析をそれぞれ一度のみ行うことで、包括的なダンパー効率の簡便な検討が、本手法により可能となる。

以上、本章に示した一連の手法は、間柱以外の制振構造においても適用が可能である。すなわち与えられた型式に対し骨組みとバネからなるモデルを作成し、動的特性の評価にはバネ剛性を無限大またはゼロとした静的解析(図 6 右 2 列)を行い、一貫して骨組みは変えず、ダンパー剛性のみを変えて解析を行うだけである。

また本手法は、粘弾性ダンパーのほか、粘性・オイルダンパーなど楕円履歴をもつもの一般を扱うことができることが文献 4 に示されている。本静的評価手法は既往の手法に比べ、汎用性、簡易性、厳密性に優れており、

速度依存型の制振構造一般の包括的な評価を可能にする手法である。

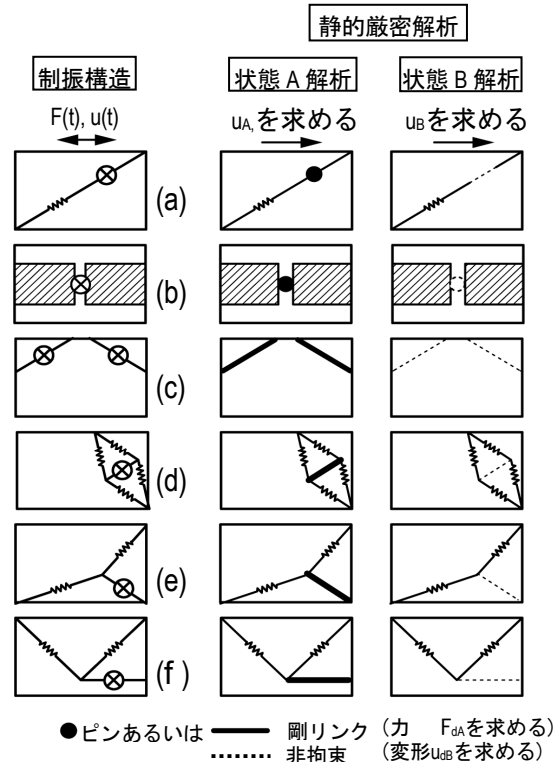


図 6 様々な形式のシステムと、その剛性・粘性を求める静的厳密解析 (Various Types of Passive Control Systems and Exact Static Analyses)

3. 多層構造物への適用

3. 1 多層構造物

前章までに一質点系モデルへの置換法を提示し、その応答が厳密解であることを示した。この理論を応用して、多質点系へと適用する。

多質点系フレームの動的解析のためのモデル化については、過去にいくつもの提示がなされている。その方法として、せん断棒モデルを用いたものと、設計したフレームそのものを用いるものの 2 つに大別することができる。また、前者は、その簡潔性のため設計理論を展開する研究や、実際設計業務においてよく用いられている。

しかし実際のフレームにおいては、部材の曲げ、軸方向変形および梁部材の変形などがあり、それらの影響をまとめて単純なせん断棒に置換することは、必ずしも易しくなく、挙動を正確に把握できないこともよくある。実際に、せん断モデルが減衰を過大評価する可能性を指摘する報告もなされている(文献 6)。

以上のことを踏まえ、この章においてはせん断棒モデルの新たな作成法を提案し、その正確性を論じる。

3. 2 2 状態に基づく静的解析の適用

一質点系モデルの理論を多質点系に応用するにあたり、対象構造物の一次モードに基づき、その動的特性がほぼ評価できると考える。これにより、1 次モード慣性力分

布に類似する静的水平力を用いた静的解析を行い、前章で示したように、状態 A, B の 2 つを用いることにする (図 7)。これは、状態 A で全層においてダンパー剛性が無限大であり、状態 B で全層においてダンパー剛性がゼロとなることを意味する。すなわち、構造物が定常状態にあるとき、各層における位相が一致することを前提として解析を行うことになる。

各層の剛性に比例したダンパー配置が行われなかった場合、必ずしも各層の位相が完全に一致するとは限らない。この件についてある程度検討を行ったところ、せん断棒モデルの精度にはさほど影響しないことを確認した。しかし、さらなる検討が必要であり、今後の課題とする。

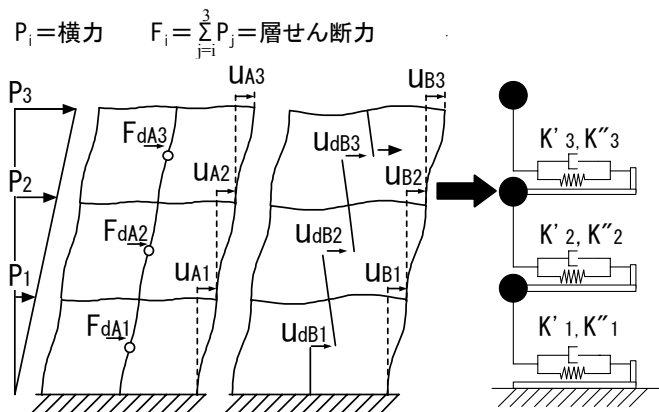


図 7 多質点せん断棒モデル作成の概要
(Proposed Scheme of MDOF Shear Beam Modeling)

3. 3 層剛性の算出

前章で述べたような、1 質点フレームに対して粘性要素 (ダッシュポット)、弾性バネ要素を算出し、せん断棒モデルに置換する方法を、多質点構造物に対しても用いることが可能である (図 7 右)。各層における貯蔵剛性、損失剛性を以下の様に評価する。

$$K'_i = \frac{F_{Ai}}{u_{Ai}} - \frac{K''_i}{\tan \phi_i} \quad (16a)$$

$$K''_i = \left(\frac{F_{Ai}}{u_{Ai}} - \frac{F_{Bi}}{u_{Bi}} \right) \left\{ \frac{1 - (\tan \phi_i) / \eta_{di}}{\tan \phi_i + (1 / \tan \phi_i)} \right\} \quad (16b)$$

$$\tan \phi_i = \frac{\eta_{di}}{1 + (u_{Bi} / u_{Ai}) \sqrt{1 + \eta_{di}^2}} \quad (16c)$$

ここに、 i は任意の層番号を示している。

これらの式は、前章において述べた評価式を多質点系に応用したものである。1 質点系においては厳密な評価ができることは前章で説明したとおりである。

3. 4 静的载荷用荷重

静的载荷に用いる荷重の分布は、現在の設計において最も一般的に使われている A_i 分布にしたがうものとする。このような層せん断力を F_i とすると、静的解析 A, B に用

いる F_{Ai}, F_{Bi} はそれに比例した任意の値である (フレームは弾性と仮定する)。

また、 i 層におけるダンパー荷重、ダンパー変形を F_{di}, A_i, u_{di}, B_i と定義し、式(16)を用いれば、 i 層における K'_i, K''_i が算出可能となる。

建物の減衰定数 ξ を算出する式は以下を用いる。

$$\xi = \frac{\sum_i K'_i (F_i / K'_i)^2}{2 \sum_i F_i^2 / K'_i} \quad (17)$$

この式の分子は粘性剛性によるエネルギー吸収、分母は貯蔵剛性によるエネルギー吸収を意味しており、この比から導かれる式である。すなわち、各層における弾性、粘性剛性、そして層せん断力分布が定めれば減衰を算出できることになる。また、一次固有周期も同様に各層の荷重を用いて以下のように表される。

$$T = \frac{\sum_i W_i (F_i / K'_i)^2}{g \sum_i P_i F_i / K'_i} \quad (18)$$

ここに、 W_i は各層の重量、 g は重力加速度である。また、 P_i は各層における分布荷重、すなわち横力を示している (図 7)。

この一連の式からわかるように、多質点系においても静的解析から弾性・粘性剛性、周期、減衰を求めることが可能となる。

3. 5 ダンパー振動数依存性の考慮について

以上の過程はダンパーの K'_d, K''_d などが既知の場合に直接適用可能である。しかし、ダンパー面積がわかっても、 K'_d, K''_d が未評価となる振動数依存ダンパーの場合には、2.3 節で示唆したように収斂計算が必要となる。そこで笠井、大熊⁷⁾ の収斂計算法を用いる。

以上より、多質点構造物のせん断棒モデルへの変換の手順を示す。

- (a) 状態 A, B の静的解析 (図 7) を 1 度のみ行う。
- (b) B の結果より、ダンパー無しフレームの固有周期 T を算出する (式(18))。
- (c) 周期 T でのダンパー剛性 K'_d, K''_d を得る (式(1), (2))。
- (d) ダンパーつきフレームの剛性 K'_i, K''_i (式(14)~(16)) と T (式(18)) を算出し、(c) に戻る。
- (e) 周期 T の収斂後、各層せん断剛性 K'_i 、粘性係数 $C_i (=K''_i / \omega_{eq})$ 、システム全体の減衰定数 ξ が求まる。

なお、 $\omega_{eq} = 2\pi / T$ である。また、収斂までの手順 (c)~(d) は表計算ででき、繰り返し数は 2~3 回^{2), 7)} でよい。

この手順を見てわかるように、骨組み解析を用いるのは一度のみであり、それ以降は骨組み解析を一切用いずに、表計算などによる収斂計算を行って動的特性を求めることができる。さらに、静的解析結果はダンパーに依

存しない、フレーム固有の結果であるため、設計段階でダンパー量の調節を行う場合にも新たな解析をする必要は無い。表計算シート上で計算が済んでしまうのは大きな利点である。

4. 部材構成モデルの作成

4.1 JSSI テーマストラクチャー

提案した多質点せん断棒モデルへの置換手法の有効性を示すため、骨組解析（以後、部材構成）モデルと本手法により作成したせん断棒モデルでそれぞれ時刻歴解析を行い、応答値を比較することで、後者の精度検証を行う。検証は間柱型とブレース型の2種類で行った。

解析対象は、JSSIテーマストラクチャー^{8),9)}の一つである。3 構面の鉄骨構造であり、ダンパー設置による応答低減を考慮した性能設計により部材断面のトリム化を行っている。建物の概要およびダンパーの設置位置を図 8, 図 9 に示す。ダンパーは1 構面につき 2 ヶ所、合計で 60 ヶ所に設置している。なお、間柱型ダンパーを入れたモデルでは、制振効率を上げるためハンチや方杖⁴⁾ など

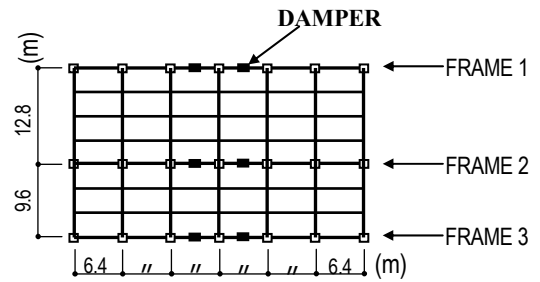


図 8 平面およびダンパーの配置 (Structural Plan and Damper Locations)

の補剛形式を考え、それを表すため間柱と梁の中心線交点から、左右梁方向・上下間柱方向に長さ 1.2m (1 階では間柱方向に 1.8m) の剛域を設けた。

フレーム 1 と 3 で部材断面が等しいため、部材構成モデルは、フレーム 1 と 3 を併せて 1 つのフレームとし (以後、フレーム 1&3 と呼ぶ)、それにフレーム 2 を並列結合したものとする (図 8, 図 9)。剛床仮定を用いて、各層において全フレームの X 方向変位を等しく設定する。ダンパーをもたない状態での建物固有周期は 1.93 秒、減衰定数 2% である。

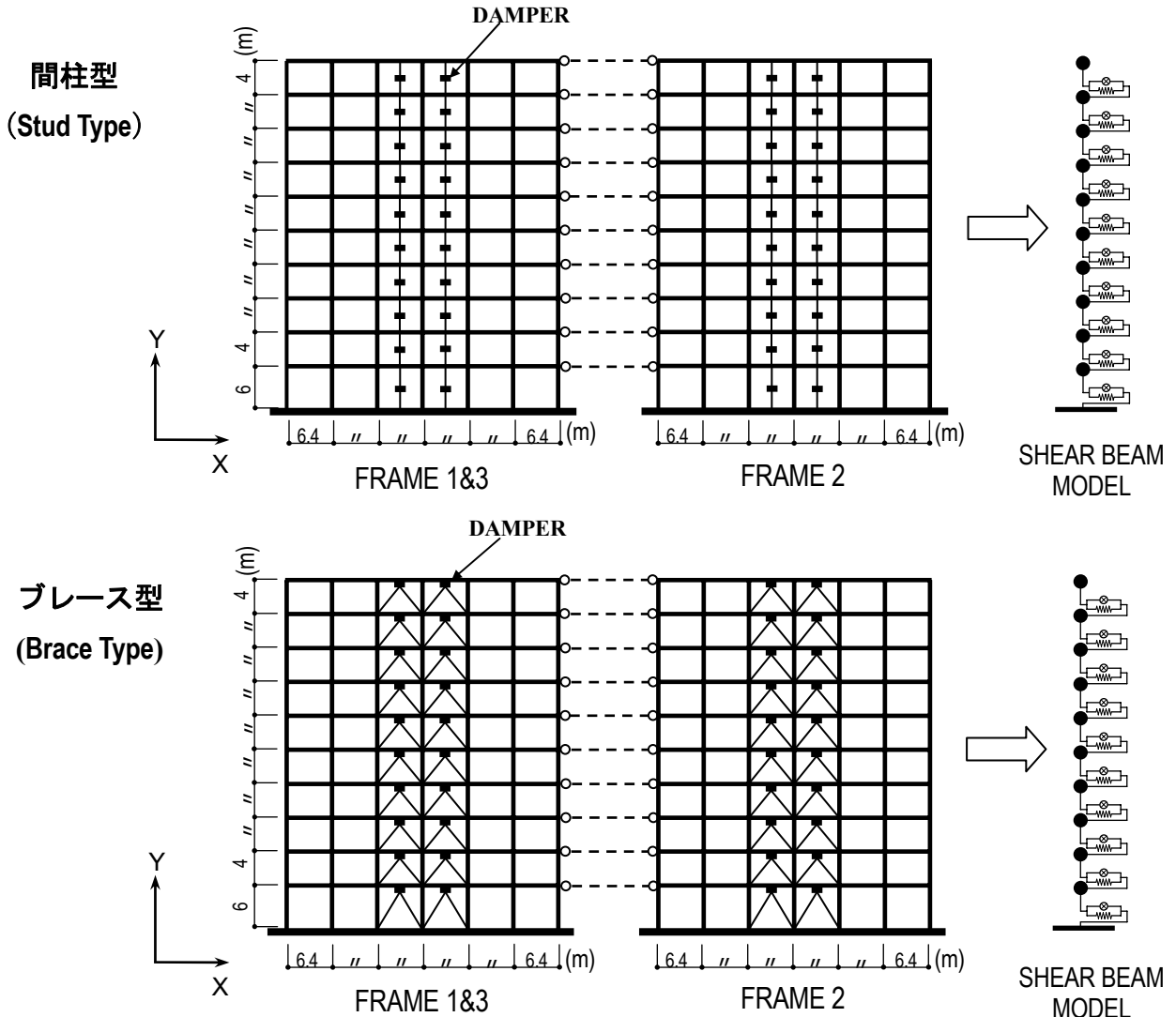


図 9 立面およびダンパーの配置 (Elevation and Damper Locations)

4.2 粘弾性ダンパーの設計

粘弾性ダンパーの設置量は、フレームの剛性分布に概ね比例する様に配置した。また、フレーム1,2,3の各層で同一のダンパーを用いることにした。表1にダンパー1体当たりのせん断面積を示す。なお、全てのダンパーのせん断厚さは1cmとしている。

表1 ダンパーのせん断面積 (cm²)
(Shear Area of Dampers)

1層	2層	3層	4層	5層
9737	14121	13901	13901	13901
6層	7層	8層	9層	10層
10714	10714	10714	8032	5187

部材構成モデルについて、表1の全層におけるダンパーサイズ(せん断面積)を倍数的に増減させ、自由振動解析に基づき固有周期と減衰定数の変化を検討した。ブレース型では、常にダンパー貯蔵剛性に対するブレース水平剛性の比が5となるようにブレース断面を決定している。結果を図10に示す。

ブレース型では、ダンパーサイズ増加に伴い減衰定数は上昇し続けるが、間柱型では1倍のダンパーサイズで頭打ちになっている(図10)。これは、ブレース型ではダンパー面積の増大にともないブレースの断面積も増加させているのに対し、間柱型では剛域および間柱断面を変更していないためである。つまり、大サイズのダンパーを用いた場合、支持部材(間柱および梁部分)の変形が増加することによって、ダンパー部変形が減少したことが原因である。これらの結果をもとに、検証に用いるダンパーサイズを間柱型では1倍、ブレース型では1倍および2倍とした。

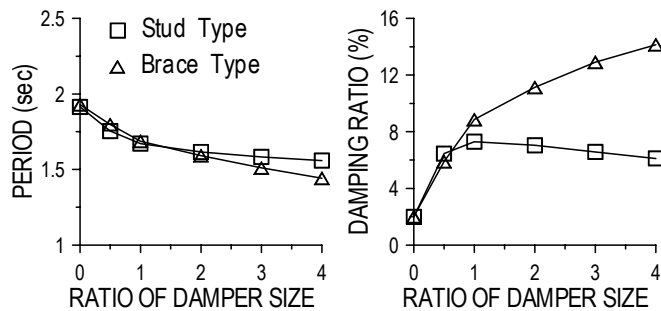


図10 固有周期と減衰定数の変化
(Period - Damper Size and Damping Ratio - Damper Size)

5. せん断棒モデルの作成と検証

5.1 各層せん断剛性と粘性の評価

4章で述べたダンパーつき部材構成モデルをせん断棒モデルに変換する。基本的に3章の方法に従うが、フレ

ーム2は他フレームと部材断面が異なるため、フレーム1&3とフレーム2の動的特性の評価を別々に行ない、その後、各フレームの層における貯蔵剛性と損失剛性を合計してせん断棒モデルの諸元とする点が追加となる。この計算を表2に示して、以下に説明する。追加作業も含め、手順は3.5節の(a)~(e)に相当している。

- (a) フレーム1&3とフレーム2を切り離した状態で、それぞれに対し状態A,B静的解析(図7)を1度行う。表2a参照のこと。
- (b) Bの結果より、フレーム1&3とフレーム2それぞれの層剛性を F_{Bi}/u_{Bi} より算出・合計し、ダンパー無し部材構成モデルの剛性と周期 T (式(18))を得る。 $T=1.93$ 秒となり、部材構成モデルの固有値と合った。
- (c) 周期 T におけるダンパー剛性 K'_{di}, K''_{di} を得る(式(1),(2))。表2bフレーム1+3とフレーム2を参照のこと。
- (d) 上記(a)と(c)から、ダンパーつきフレームの剛性 K'_i, K''_i を、フレーム1&3と2それぞれで算出する(式(14)~(16))。また、各フレームの K'_i を足し合わせた後、 T (式(18))を算出し、(c)に戻る。表2bのそれぞれを参照のこと。
- (e) 周期 T の収斂後、各層せん断剛性 K'_i 、粘性係数 $C_i (=K''_i/\omega_{eq})$ 、システム全体の減衰定数 ξ が求まる。収斂後の結果として、表2cを参照のこと。

なお、収斂計算2回で十分な精度を得たが、厳密性のため、本検証では5回行っている。

5.2 せん断棒モデルに関する注釈

前節で示したように、せん断棒モデルは、各層がダッシュポットと弾性バネから成るKelvin体である。ところで、文献2が指摘したように、Kelvin体は、式(2)の特性をもつ粘弾性体を組み込んだ部材構成モデルの層と比べ、振動数依存性に、かなりの違いがある。しかしながら、固有周期で振動する場合に同等な K'_i, K''_i つまり楕円履歴(式(5))をもたせるように設定している。ちなみに、 K'_i から得られる固有周期や、 K''_i と K'_i の比から得られる減衰定数 ξ に関しては、本論で用いたJSSIテーマストラクチャーにおいて、部材構成モデル自由振動から得た値(4.2節)と、上記表計算により得た値とが非常によく合っていたことを記しておく。

しかしながら、地震波に対する応答の場合、固有周期成分のほかにも高次の成分も含まれるとともに、部材構成モデルの膨大な自由度を、数えられるほどにまで縮小した面などに関し、十分な検証が必要である。よって、そのような検証を今後の課題とするが、現段階での一部結果を次節で示す。

表2 プレース型 収斂計算の過程と結果
(Iteration of Shear Beam Mode for Brace Type)

(a) 静的解析結果

フレーム 1+3 (合計)								フレーム 1+2+3								
状態 A				状態 B				状態 A				状態 B				重量 W(tonf)
階	F _{Ai}	u _{Ai}	F _{di}	F' _{Bi}	u' _{Bi}	u' _{dBi}	階	F _{Ai}	u _{Ai}	F _{di}	F' _{Bi}	u' _{Bi}	u' _{dBi}			
10	2.53	0.015	1.10	2.53	0.029	0.029	10	2.53	0.025	1.033	2.53	0.045	0.045	775.8		
9	4.61	0.019	2.54	4.61	0.043	0.043	9	4.61	0.033	2.434	4.61	0.068	0.068	577.2		
8	6.44	0.021	3.92	6.44	0.053	0.053	8	6.44	0.033	3.331	6.44	0.069	0.069	582.8		
7	8.09	0.024	4.89	8.09	0.060	0.060	7	8.09	0.039	4.140	8.09	0.078	0.079	586.4		
6	9.60	0.025	5.23	9.60	0.057	0.057	6	9.60	0.040	4.501	9.60	0.079	0.079	591.9		
5	10.99	0.024	6.81	10.99	0.062	0.062	5	10.99	0.040	5.965	10.99	0.086	0.086	594.3		
4	12.27	0.026	7.66	12.27	0.067	0.067	4	12.27	0.042	6.445	12.27	0.087	0.087	599.2		
3	13.45	0.025	7.87	13.45	0.062	0.062	3	13.45	0.041	6.569	13.45	0.081	0.081	602.3		
2	14.54	0.027	9.45	14.54	0.067	0.067	2	14.54	0.045	7.815	14.54	0.087	0.087	603.7		
1	15.54	0.056	6.29	15.54	0.100	0.100	1	15.54	0.088	4.928	15.54	0.135	0.135	619.1		

(b) 表計算 (1回目)

フレーム 1+3 (合計)					フレーム 2					フレーム 1+2+3				
階	K' _{di}	η _{di}	K' _i	K'' _i	階	K' _{di}	η _{di}	K' _i	K'' _i	K' _i	K'' _i			
10	36.8	0.867	117.7	14.3	10	18.4	0.867	72.0	7.8	189.7	22.1			
9	57.1	0.867	153.5	22.7	9	28.5	0.867	90.7	11.9	244.2	34.6			
8	76.1	0.867	183.4	30.9	8	38.1	0.867	124.7	16.3	308.1	47.2			
7	76.1	0.867	197.8	32.6	7	38.1	0.867	134.9	16.9	332.7	49.5			
6	76.1	0.867	234.1	35.1	6	38.1	0.867	155.0	18.2	389.1	53.3			
5	98.8	0.867	257.8	43.8	5	49.4	0.867	168.9	22.4	426.7	66.1			
4	98.8	0.867	266.6	45.7	4	49.4	0.867	183.3	23.4	449.9	69.0			
3	98.8	0.867	303.3	48.5	3	49.4	0.867	209.6	24.6	512.9	73.0			
2	100.3	0.867	295.8	45.7	2	50.2	0.867	206.2	22.9	502.0	68.6			
1	69.2	0.867	208.9	22.4	1	34.6	0.867	142.7	11.3	351.6	33.7			

ξ = 0.072, T = 1.66sec

(c) 表計算 最終結果 (5回目)

フレーム 1+3 (合計)					フレーム 2					フレーム 1+2+3				
階	K' _{di}	η _{di}	K' _i	K'' _i	階	K' _{di}	η _{di}	K' _i	K'' _i	K' _i	K'' _i			
10	40.3	0.888	119.9	14.8	10	20.1	0.888	73.1	8.1	193.0	23.0			
9	62.4	0.888	156.8	23.8	9	31.2	0.888	92.5	12.5	249.3	36.3			
8	83.2	0.888	187.9	32.4	8	41.6	0.888	127.1	17.2	315.0	49.6			
7	83.2	0.888	202.6	34.4	7	41.6	0.888	137.4	17.9	339.9	52.3			
6	83.2	0.888	239.2	37.1	6	41.6	0.888	157.6	19.3	396.8	56.4			
5	107.9	0.888	264.1	46.3	5	54.0	0.888	172.1	23.7	436.2	70.0			
4	107.9	0.888	273.2	48.4	4	54.0	0.888	186.7	24.8	459.9	73.3			
3	107.9	0.888	310.2	51.5	3	54.0	0.888	213.1	26.2	523.4	77.7			
2	109.6	0.888	302.3	48.7	2	54.8	0.888	209.5	24.4	511.8	73.1			
1	75.6	0.888	212.3	23.0	1	37.8	0.888	144.4	11.7	356.7	34.7			

ξ = 0.075, T = 1.64sec

(単位は荷重 (tonf), 剛性 (tonf/cm), 長さ (cm))

5.3 時刻歴応答解析結果

せん断棒モデルの精度検証として、その時刻歴応答を部材構成モデルと比べる。フレームを弾性と仮定する。

初期減衰を Rayleigh 減衰によりモデル化する。すなわち、部材構成モデルにおいては、質量と剛性それぞれに対する比例係数を、ダンパー無しモデルの 1 次・2 次モードで減衰定数 2% が得られるように設定する。また、同値の係数をダンパーつきモデルにも適用することにし

た。さらに、せん断棒モデルにおいても、同値の係数をそのまま用いることにした。

初期減衰のモデル化については、文献 9 が記したように論議の余地が有るが、粘弾性ダンパーを用いた場合は、ダンパーによる付加減衰の影響のほうが、明らかに大きい。よって現段階では、せん断棒モデルと部材構成モデルの間の初期減衰設定法に関し、厳密な整合性を保つこ

とは不必要と考えるが、今後の課題としたい。

入力にはJMA神戸波を 0.5G最大加速度に縮小したものと、BCJ-L2 を用いた。解析時間刻みは部材構成モデル、せん断棒モデルともに 0.01 秒である。また、部材構成モデルのダンパー部には、笠井らの分数微分構成則⁹⁾を用いた。ダンパーの温度上昇はないものと設定している。

部材構成モデルとせん断棒モデルの解析結果を図 11~図 22 に示す。モデルの変位、層間変形角、加速度、層せん断力の最大値および 1, 6, 10 層の時刻歴を示している。

解析結果より、最大応答および時刻歴波形の両方で、間柱型、ブレース型の構造形式、そして JMA 神戸波と BCJ-L2 波の入力を問わず、せん断棒モデルの解析結果はフレームモデルのそれと良く一致していることが確認できる。

また、層間変形角、加速度、層せん断力のいずれにおいても誤差が大きくなるのは上層部であることがわかる。これは、せん断棒モデルの振動数依存性が部材構成モデルのそれと異なることや (5.2 節)、他のさまざまな要因が複合して起こっている可能性もあり、原因について詳細な検討を行なっていきたい。

なお、間柱型の制振構造は前章までに示したように、フレームとダンパーの間に位相差が存在し、はり・柱の曲げ、せん断、軸方向変形が作用して全体の動的特性を決定しているという、ブレース型とは異なる複雑な挙動を示すモデルである。このような場合でも、本手法により十分な精度をもつモデル化が可能ながわかる。

6. まとめ

本論では、速度依存型ダンパーを用いた制振構造に適用可能な、簡易でかつ正確な評価法を提案した。また、その評価法に基づいた多質点せん断モデルへの置換方法を構築し、時刻歴応答解析によりその精度を検証した。以下に、本論より得られた知見を述べる。

- (1) 粘弾性材料と諸部材断面に基づき、1 質点系制振構造の剛性・粘性や定常応答時の動的特性・挙動を簡易かつ厳密に得る静的手法を提案した。本手法は、ねじれ・軸方向・せん断変形を考慮することができるため、さまざまな種類の速度依存型制振構造に用いることができ、包括性・汎用性に優れている。
- (2) 本手法の適用を多質点系構造体に拡大した。多質点系においても状態 A,B の 2 種類の静的解析を行えば、表計算によってダンパーの振動数依存性まで考慮した動的評価が可能であり、簡便な手法である。
- (3) 本手法を用いて作成したせん断棒モデルと、部材構成モデルの解析結果を比べ、両モデルがよい一致を示していることを確認した。また、間柱型とブレース型のせん断棒モデルの精度に大きな差異は認められず、間柱型のような複雑な構造においても、十分な精度を

もつモデル化が可能であることがわかった。

なお、間柱型を始めとする速度依存制振構造の性能幅に関する定量的評価への応用、また、誤差を生ずる原因の詳細な検討などを、今後の課題とする。

<謝辞>

東亜建設工業、原 博氏から、部材構成モデルを作成・提供していただきましたことに、感謝いたします。

<文献>

- 1) Kasai K., Fu Y., and Watanabe A., "Passive Control Systems for Seismic Damage Mitigation", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, [124], 1998 (5), pp.501-512,
- 2) 笠井和彦、大熊潔 “Kelvin 体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察” ;日本建築学会構造系論文集,2001.12, [550],pp.71-78
- 3) 笠井和彦、大熊潔 “線形粘弾性ダンパーの Kelvin モデル化手法における精度改良に関する考察” ;日本建築学会構造工学論文集,2002.3, [48B], pp.545-553
- 4) 笠井和彦、城台顕 “間柱型ダンパーをもつ制振構造の動的特性およびそれらの簡易評価法に関する研究” ;日本建築学会構造系論文集, 2002.8, [558], pp.401-406
- 5) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健, “粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則, 日本建築学会構造系論文集, 543 号, pp 77-86, 2001.5
- 6) 打越瑞昌 “設計例 7-オイルダンパーを用いた超高層ホテル”, 応答制御構造設計法, 日本構造技術者協会編, 彰国社,2001,pp138-150
- 7) 笠井和彦、大熊潔 (1999) “粘弾性ダンパー制振構造の近似解析法—その 2 : 多自由度系の全体減衰モデルについて” ;日本建築学会大会学術梗概集,9 月, pp.1003-1004
- 8) 大淵敏行, 森裕重, 吉江慶祐, 原博, 有馬史子, 竹内百合, 斉藤芳人, 石井正人, 笠井和彦 (2002) 制振構造のテーマストラクチャーの提案と解析モデル化の検討, その 1 : 4, 10, 20 層の制振・非制振テーマストラクチャーに関する詳細情報, 2002 パッシブ制振構造シンポジウム論文集, 東京工業大学建築物理研究センター
- 9) 竹内百合, 原博, 石井正人, 斉藤芳人, 有馬史子, 森裕重, 大淵敏行, 吉江慶祐, 笠井和彦 (2002) 制振構造のテーマストラクチャーの提案と解析モデル化の検討, その 2 : せん断棒・曲げせん断棒へのモデル化と時刻歴解析精度, 2002 パッシブ制振構造シンポジウム論文集, 東京工業大学建築物理研究センター

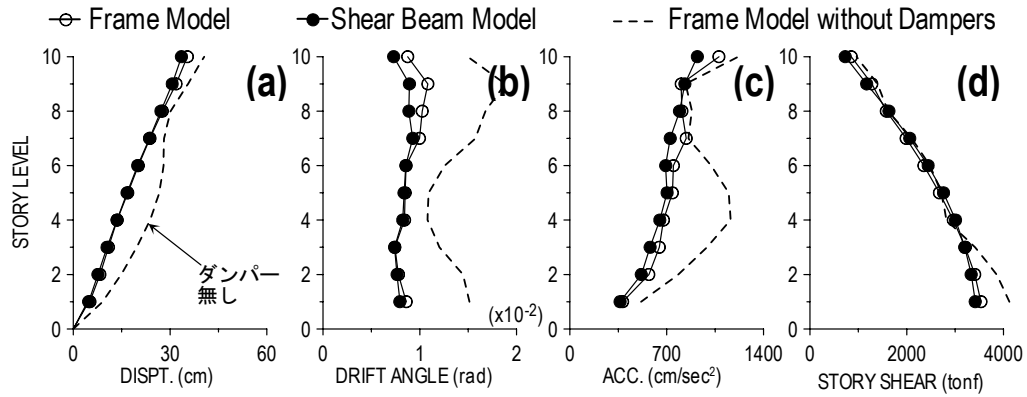


図 11 最大応答 (間柱型、JMA 神戸) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Envelops (Stud-Type, JMAKobe) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

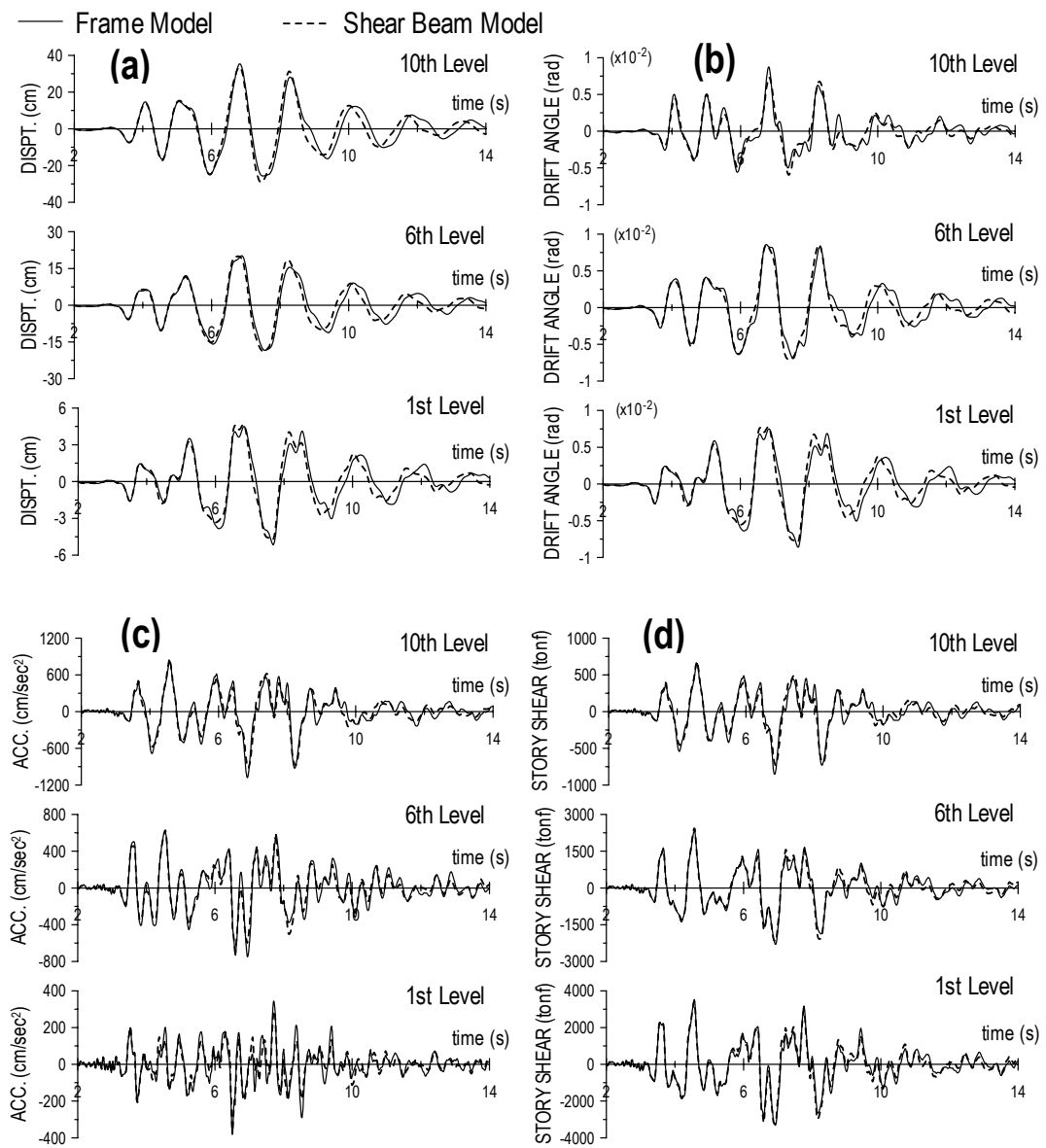


図 12 応答時刻歴 (間柱型 JMA 神戸) : (a)相対変形、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Histories (Stud-Type, JMAKobe) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

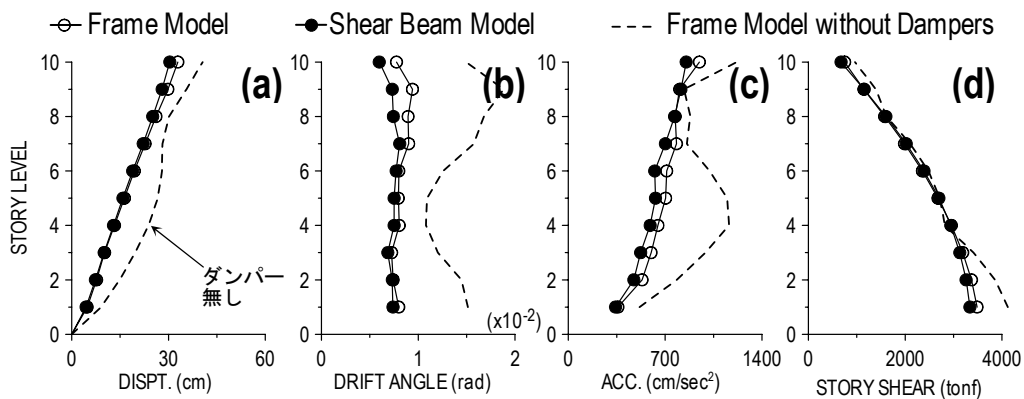


図 13 最大応答 (ブレース型、JMA 神戸) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Envelops (Brace-Type, JMAKobe) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear

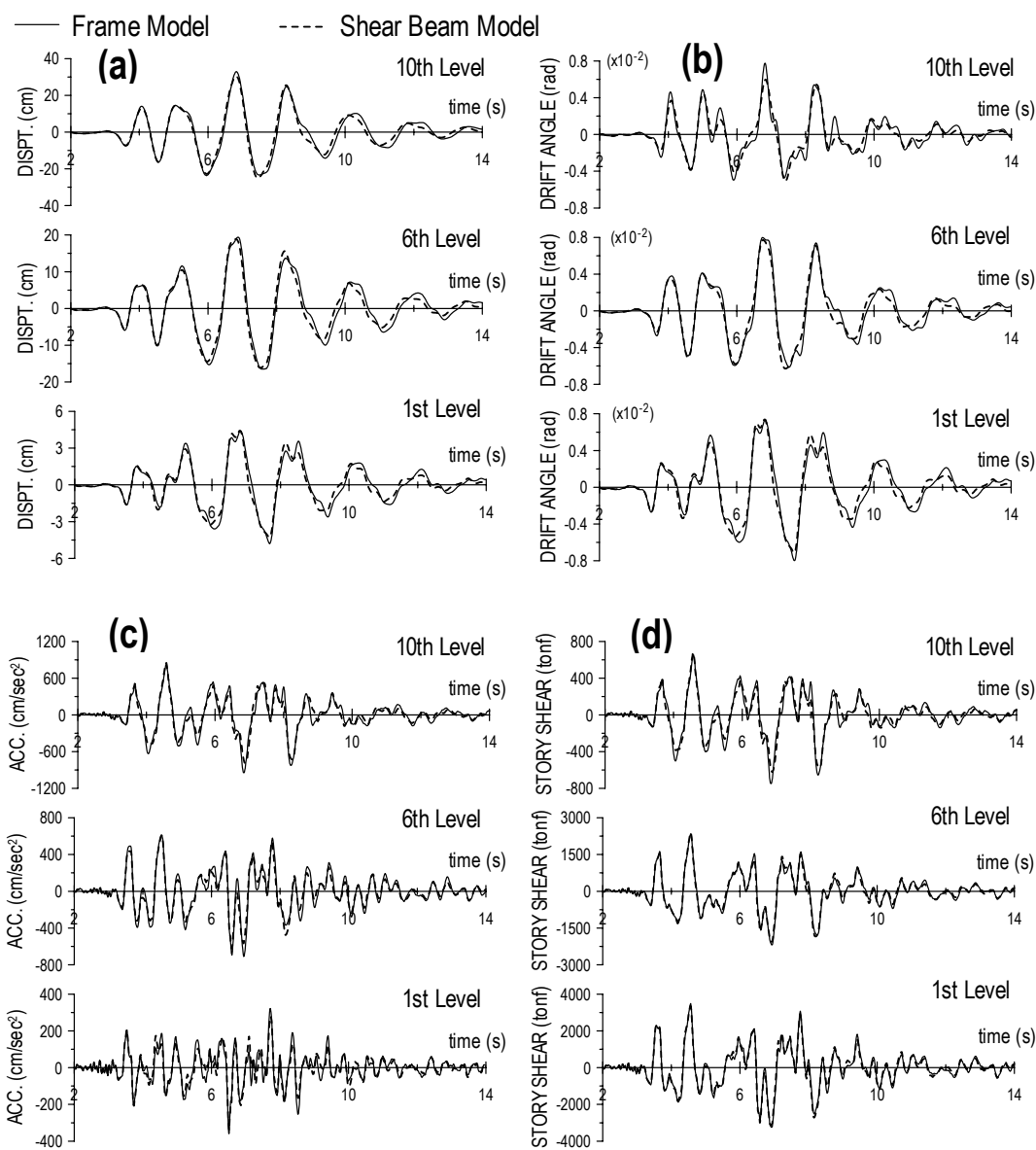


図 14 応答時刻歴 (ブレース型 JMA 神戸) : (a)相対変形、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Histories (Brace-Type, JMAKobe) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear

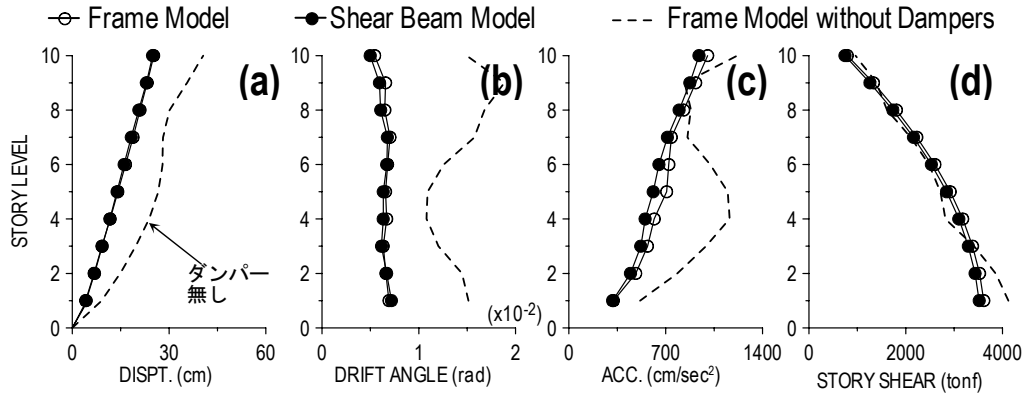


図 15 最大応答 (2倍ダンパー剛性ブレース型、JMA 神戸) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Envelopes (Brace-Type with Double Damper Stiffness, JMAKobe)
 : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

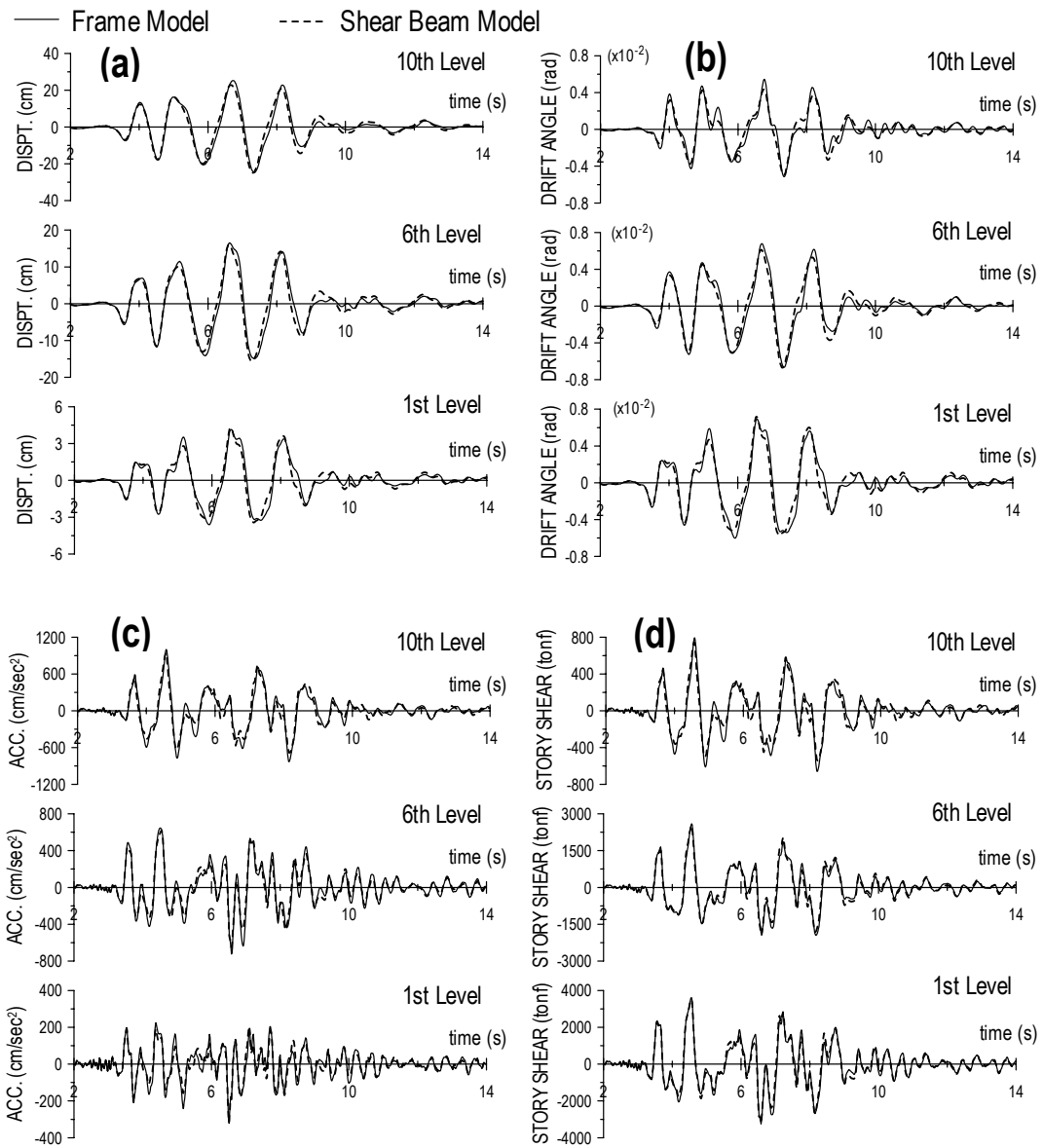


図 16 応答時刻歴 (2倍ダンパー剛性ブレース型 JMA 神戸) : (a)相対変形、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Histories (Brace-Type with Double Damper Stiffness, JMAKobe)
 : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

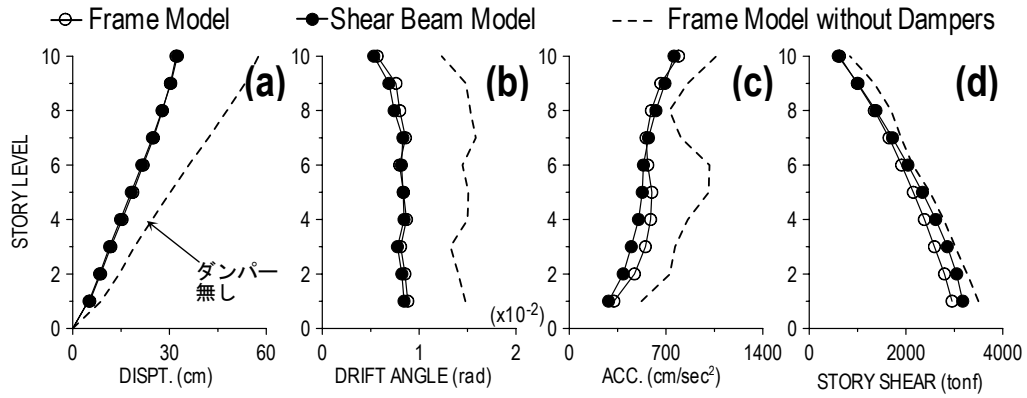


図 17 最大応答 (間柱型、BCJ-L2) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Envelops (Stud-Type, BCJ-L2) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

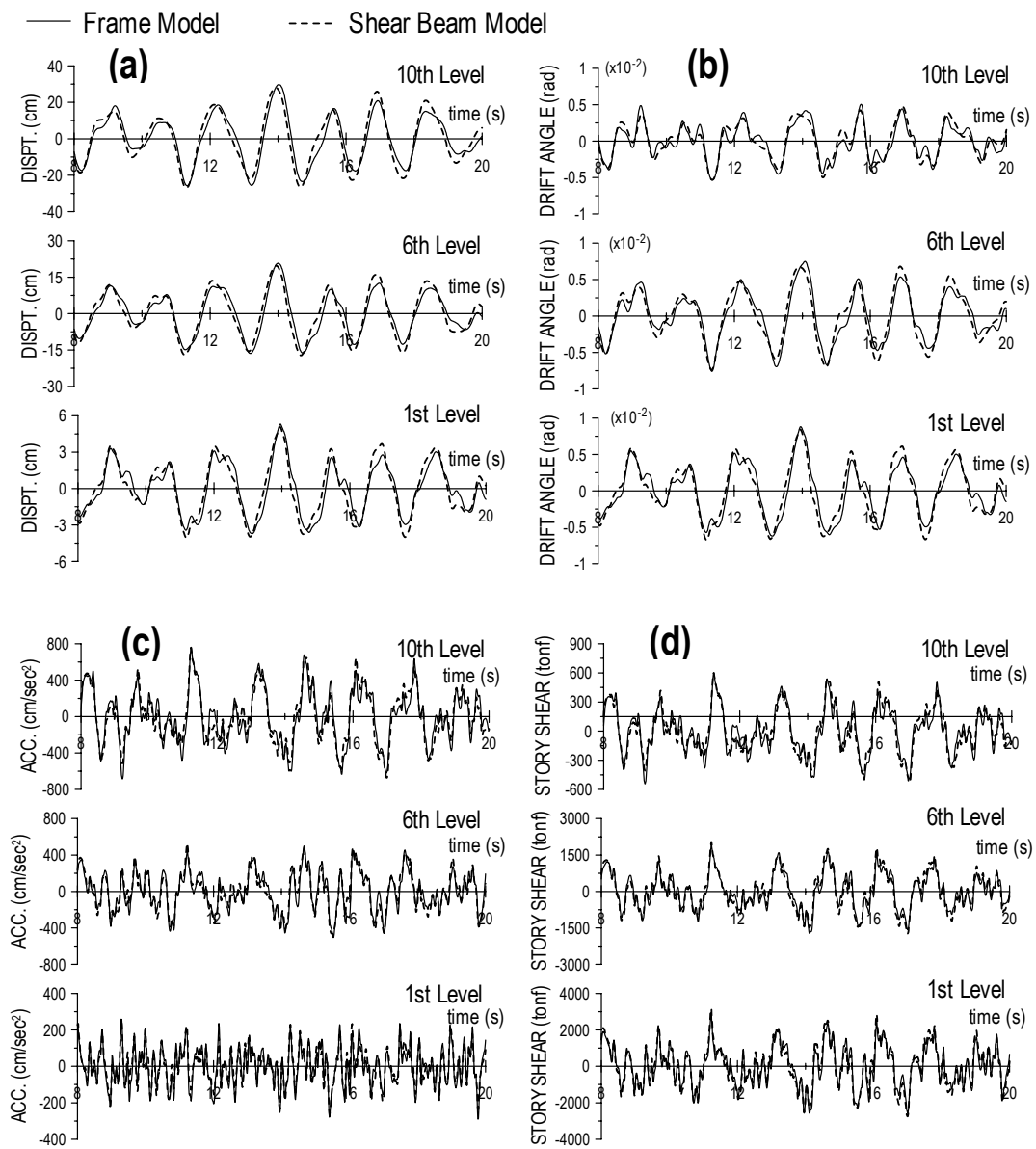


図 18 応答時刻歴 (間柱型、BCJ-L2) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Histories (Stud-Type, BCJ-L2) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

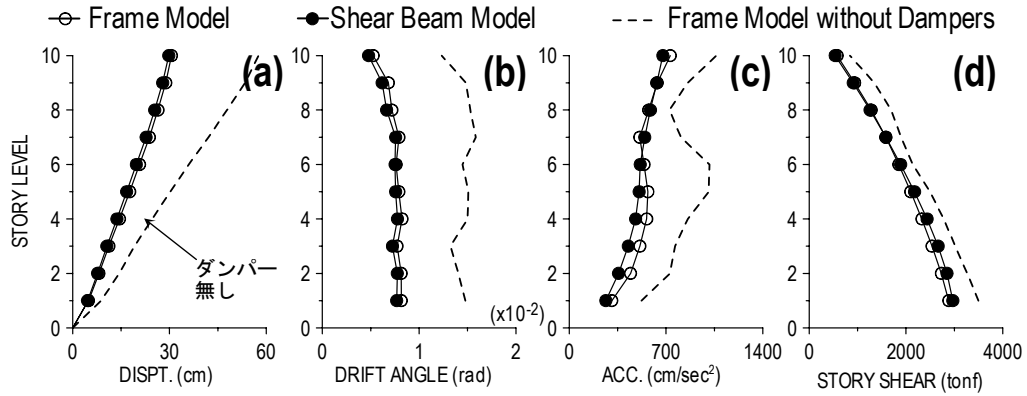


図 19 最大応答 (ブレース型、BCJ-L2) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Envelops (Brace-Type, BCJ-L2) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

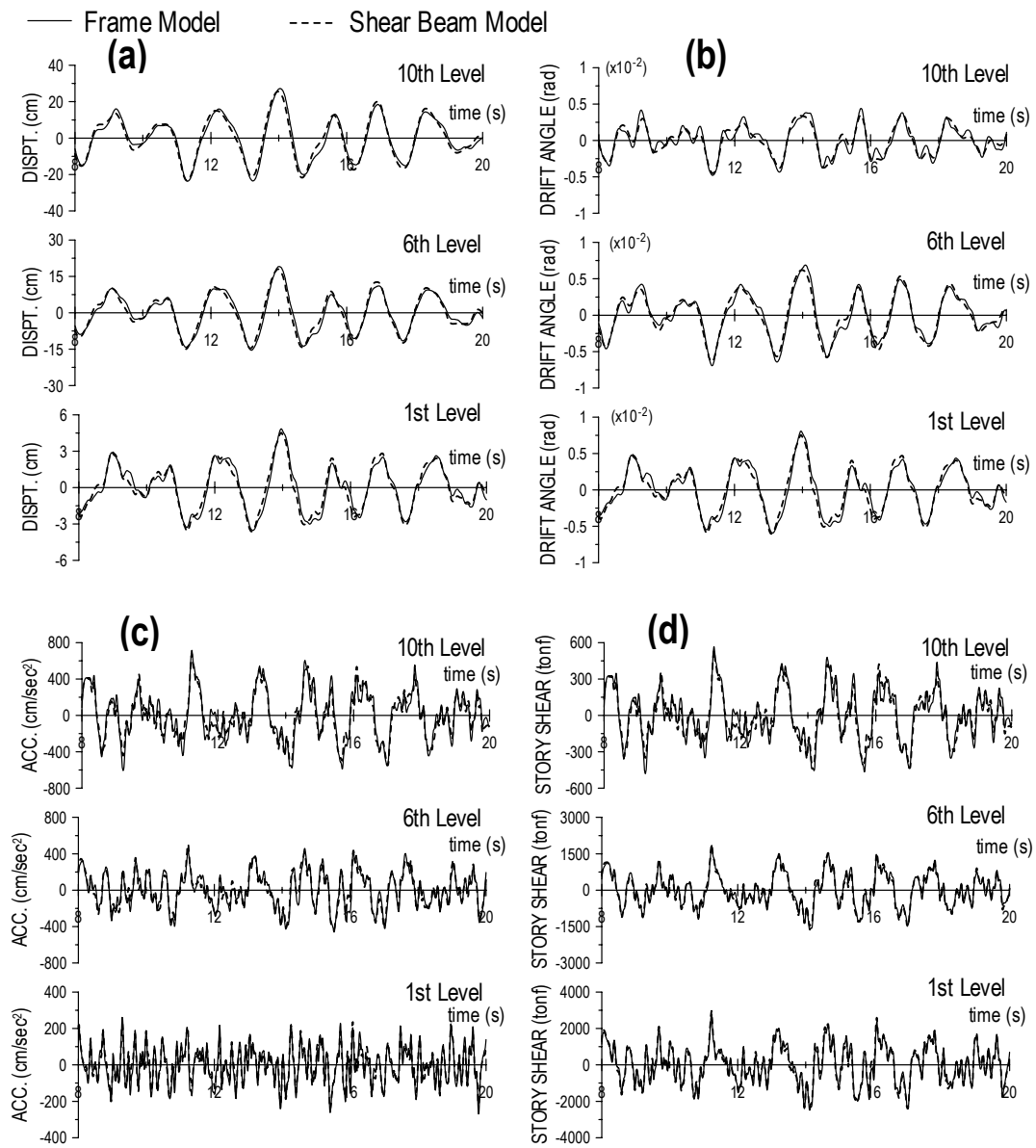


図 20 応答時刻歴 (ブレース型、BCJ-L2) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Histories (Brace-Type, BCJ-L2) : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

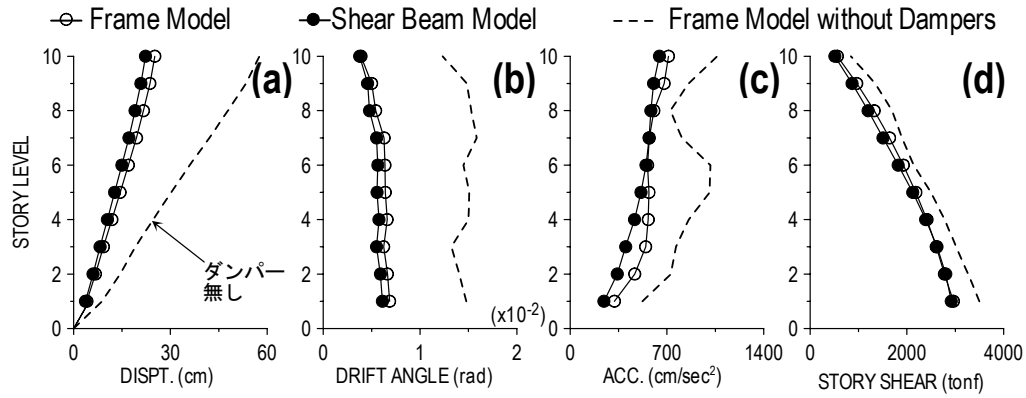


図 21 最大応答 (2倍ダンパー剛性ブレース型、BCJ-L2) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Envelopes (Brace-Type with Double Damper Stiffness, BCJ-L2)
 : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)

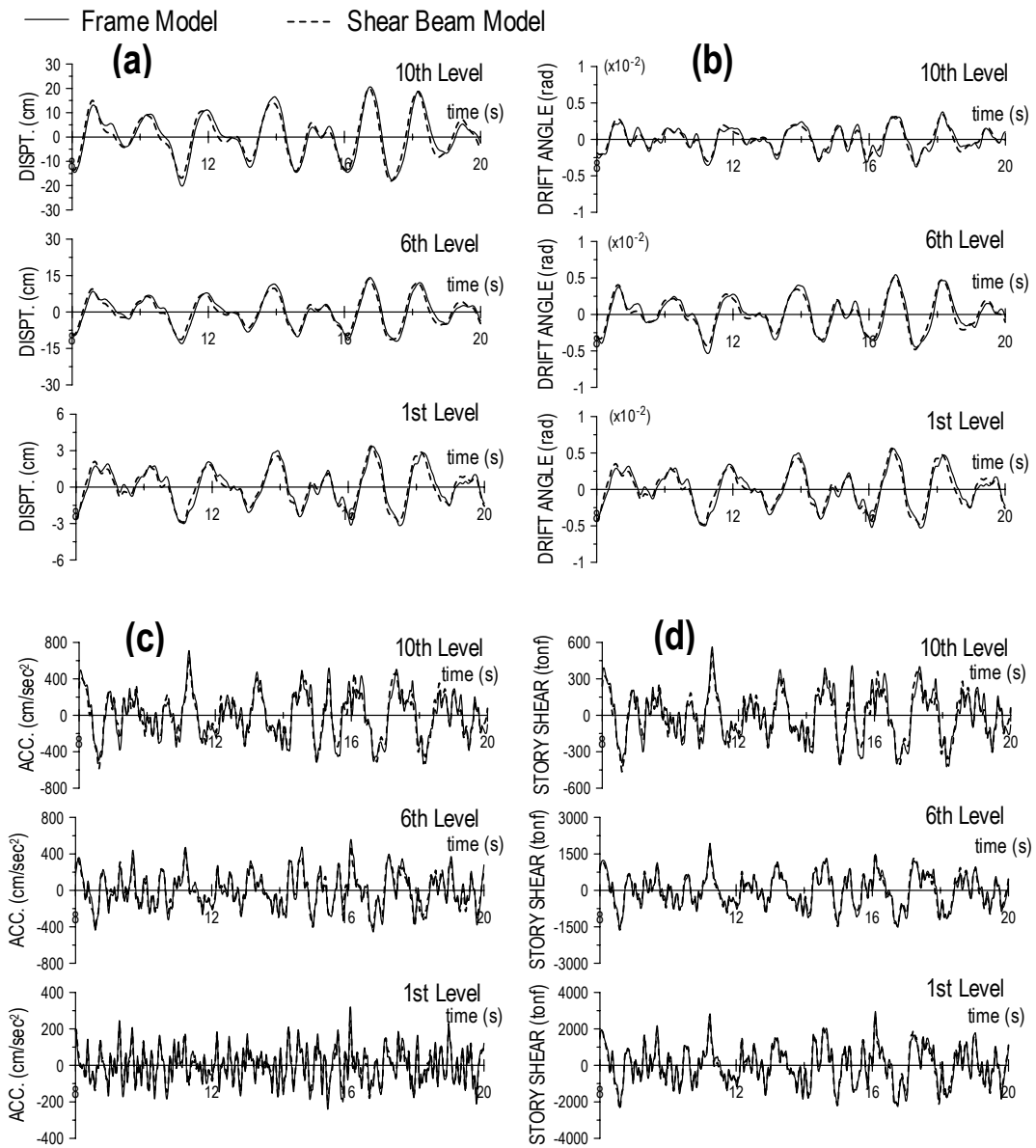


図 22 応答時刻歴 (2倍ダンパー剛性ブレース型、BCJ-L2) : (a)変位、(b)層間変形角、(c)加速度、(d)層せん断力
 (Response Histories (Brace-Type with Double Damper Stiffness, BCJ-L2)
 : (a)Displacement, (b)Drift Angle, (c)Acceleration, and (d)Story Shear)