地震入力レベルを考慮した連結機構摩擦ダンパーの
免震戸建て住宅への適用性APPLICATION OF FRICTION DAMPER WITH COUPLING MECHANISM DESIGNED
IN ACCORDANCE WITH INPUT GROUND MOTION LEVELS
TO A BASE ISOLATED DETACHED HOUSE池 永 昌 容^{*1}, 福 見 祐 司^{*2}, 五十子 幸樹^{*3}, 井 上 範 夫^{*4}*Masahiro IKENAGA, Yuji FUKUMI, Kohju IKAGO
and Norio INOUE*

For the extremely large or the long period ground motions, it is feared that the base isolation layer collides with the side wall due to the extremely large displacement. In case dampers with large capacity are incorporated with the base isolation layer, the effect of the base isolation decreases due to the large reaction force of dampers in small seismic events. To realize the control of the displacement and the acceleration which is the important factor of the base isolation effect, the friction damper with coupling mechanism is proposed. Analytical studies are conducted using the base isolated detached houses with slide bearings and the proposed dampers. To decide a series of damper parameters, the optimum design method is used. Results indicate that the friction damper with coupling mechanism can control the maximum displacement and the maximum acceleration within the design criteria which is decided individually for the input ground motion level.

Keywords : *Base isolated structure, Friction damper with coupling mechanism, Displacement control design, Two stage optimum design method*

免震構造, 連結機構摩擦ダンパー, 変位制御設計, 二段階最適設計法

1. はじめに

兵庫県南部地震以来、病院、公共建物、共同住宅や戸建て住宅などの新築建物や歴史的建造物などの耐震補強に免震構造が多く適用され、現在も増加の一致を辿っている¹⁾。免震建物では、建物基礎部に剛性が低い免震層を設置することで、地震動時に上部構造に作用する床応答加速度を低減させている。この場合、免震層には大きな変位が生じるために、基礎擁壁部と免震建物の間にはクリアランスを設けて両者の衝突を防いでいる。しかしながら、近年注目を集めている長周期超継続時間地震動では、固有周期の長い免震構造建物が共振する可能性が高く、また設計で想定されている地震動を上回るレベルの巨大地震動を受けた場合にも、免震層に過大な応答変位が生じて免震層が擁壁部に衝突する可能性がある。衝突の衝撃により上部構造には大きな床応答加速度とせん断力が生じる危険性があることが指摘され、衝突時の応答特性が実験的、解析的に検討されている^{2)~8)}。特に巨大地震では長周期地震動の成分が多くなり、免震層の応答変位が極めて大きくなることも考えられるため、擁壁と免震層との衝突問題は解決すべき喫緊の課題である。

近年、特に戸建て住宅ですべり支承を用いた免震建物が普及しているが、すべり支承は変位によらず一定の摩擦力によって減衰効果を発揮するため、過大変形時には等価な減衰定数が低下して、変形が増大する危険性が考えられる。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、すべり支承免震を採用した住宅の免震層変位が一般的なクリアランス長さの300mmを超える記録も報告されている⁹⁾。

この免震建物における衝突問題の解決手法として、たとえば免震層と擁壁部とのクリアランスを大きくすることが挙げられるが、日本の敷地事情を考慮すると困難な場合も多い。一方で想定を超える巨大地震を対象に、免震層の応答変位を低減させるために減衰を大きくすると、上部構造に大きな床応答加速度が生じて、中小地震および大地震時に対する免震構造としての性能は低下してしまう。

以上のような問題に対して、大地震時には床応答加速度を低減しつつ、それを越える巨大地震時や、巨大地震をも越える極大地震時には免震層変位を抑制するという、地震入力レベルごとの設計クライテリアを満足させる設計法として、井上、五十子らは応答変位に応じてダンパー性能を変化させる性能可変オイルダンパー¹⁰⁾を用い

*1 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻
助教・博士(工学)

*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 大学院生

*3 東北大学災害科学国際研究所 教授・博士(工学)

*4 東北大学 名誉教授・工博

Assistant Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku University, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku University

Prof., International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, Dr. Eng.

Prof. Emeritus, Tohoku University, Dr. Eng.

た変位制御設計¹¹⁾を提唱している。またその設計を実現化する装置のもう一つの例として、設定した変形までは機能せずその変形を超えると摩擦力を発揮して大変形に対するストッパーの役目を果たす、連結機構摩擦ダンパー（以下、Friction Damper with Coupling mechanism、略して FDC と表記することがある）が提案されている。FDC に関する研究としては、時刻歴応答解析による検討のほかに、縮小免震試験体を用いた振動実験などが行われている¹²⁻¹⁷⁾。

連結機構摩擦ダンパーの設計手法として、(1) 通常の設計で想定しているレベルを超える巨大地震（以下、レベル3と表記する）に対する安全装置として1種類のFDCを設置する設計（以下、1段連結と表記することがある）、(2) レベル3を含めた入力地震動レベルごとに設定した設計クライテリアを満足するようなきめ細かい設計のために複数種類のFDCを設置する設計¹⁷⁾（以下、多段連結と表記することがある）、の2種類が考えられる。本論では1種類のFDCを用いた1段連結と、2種類のFDCを用いた多段連結（以下、2段連結）の2種類の設計法を検討する。

上記のようなダンパー設計において、特に入力レベルごとの設計クライテリアを想定する場合には、複数の設計クライテリアを同時に満たすようなダンパーパラメータを決定する必要があり、パラメトリックスタディの試行回数が非常に多くなるとともに、得られた設計解が最も優れた解である保証を得ることは困難である。そこで本論では、連結機構摩擦ダンパーの設計に逐次2次計画法による最適設計手法^{18,19)}を利用する。ただし2段連結の検討では入力地震動レベルごとに異なる性状をもつ複数の装置を使用する設計を行うため、最適設計問題の規模が大きくなりまた複雑になる。このような複雑な最適設計問題を分割することで規模の小さな問題に緩和し、段階的に最適設計問題を解く2段階最適設計法が中村ら²⁰⁾、上谷ら²¹⁾によって提案されている。本論でも2段連結の検討時には、最適化問題を分割した2段階最適設計法を用いる。

2. 連結機構摩擦ダンパーの概要

2.1 ダンパーの機構

連結機構摩擦ダンパーのダンパー模式図とダンパー力-変位関係を図1に示す。連結機構摩擦ダンパーは、連結部と弾性ばねで接続された摩擦部の2要素で構成されている。

図1 連結機構摩擦ダンパー

まずダンパー設置時は、連結部の外部ロッドと内部連結機構は分離しており、両者の距離を設定クリアランス L_s と定義する。ダンパー変位が設定クリアランス L_s を超えた場合、外部ロッドと内部連結機構が連結し、ダンパーは摩擦力を発揮する。摩擦部はダンパー外周部に金属環を設置し、金属環を外部からのねじで締め付けることで摩擦部に作用する締め付け力を調整する。ダンパーの状態は、外部ロッドと内部連結機構との連結の有無で2段階に分けられる。

a) 連結前

ダンパー変位が設定クリアランス L_s 以下の場合、外部ロッドと摩擦部とは独立して変形し、ダンパーは抵抗力を発揮しない。

b) 連結後

外部ロッド変位が設定クリアランスを超えると外部ロッドと内部連結機構が連結し、その後は外れることなく摩擦抵抗力を外部ロッドに伝える。FDCの力学的特性は、弾性ばね剛性 K_d [kN/m] による弾性復元力と摩擦部の締付による最大摩擦力 F_d [kN] からなる完全弾塑性型となる。

2.2 ダンパーの力学特性

図2にFDCの力学モデルとダンパー力-変位関係を示す。力学モデルは、クリアランス部、弾性ばね、フリクションスライダーの3要素の直列結合で表される。ダンパー変位が設定クリアランス L_s 以下の連結前は、摩擦力は発揮されずダンパー力は0となる。ダンパー変位が一度でも設定クリアランス L_s を超えると、それ以後は弾性ばねの剛性とフリクションスライダー部の摩擦力によるバイリニア型履歴挙動を示す。

2.3 2種類の連結機構摩擦ダンパーを取り付けた場合の力学特性

2段連結の連結機構摩擦ダンパーとして特性が異なる2種類のダンパーを取り付けた場合の作動機構は、2種類のダンパーの連結状態により3段階に分けられる。最大応答変位を D_{max} とした場合について、図3の力学モデルを用いて説明する。ここで K_{d1} 、 F_{d1} 、 L_{s1} 、 K_{d2} 、 F_{d2} 、 L_{s2} は、それぞれ1段目のFDC（以下、FDC1）と2段目のFDC（以下、FDC2）のばね剛性、最大ダンパー力、設定クリアランスである。

a) 連結前 ($0 \leq D_{max} < L_{s1}$)

免震層変位が設定クリアランス L_{s1} に達していないので、ダンパー

図2 連結機構摩擦ダンパーの力学モデル

図3 2段連結の力学特性

は作動せず、ダンパー力は0である。

b) 1 段目の連結 ($L_{s1} \leq D_{\max} < L_{s2}$)

免震層変位が FDC1 の設定クリアランス L_{s1} に達したことにより、FDC1 が連結し、ダンパー力 F_{d1} を発揮する。

c) 2 段目の連結 ($L_{s2} \leq D_{\max}$)

免震層変位が FDC2 の設定クリアランス L_{s2} に達したことにより、FDC2 もダンパー力 F_{d2} を発揮する。この後、全体としてのダンパー力は、FDC1 と FDC2 のダンパー力を合わせて $F_{d1} + F_{d2}$ となる。

3. 解析概要

3.1 解析モデル諸元

本論での検討対象建物の解析モデル、等価粘性減衰定数、解析諸元、振動特性をそれぞれ図 4 (a)、(b)、表 1、図 5 に示す。解析モデルはすべり支承を持つ 2 階建て免震戸建て住宅を想定しており、3 質点系となる。主系減衰は剛性比例型で、木造建物の一般的な粘性減衰定数として一般的な 3% とした。免震層クリアランスは 0.300m とし、以後の検討では最大免震層変位を 0.300m 以下に抑えることが主な目的となる。図 5 (a)、(b) に解析モデルの刺激関数を示す。

本論で検討するすべり支承は、標準摩擦型すべり支承を想定した 0.046 と、低摩擦型すべり支承を想定した摩擦係数 0.015 の 2 種類とする。すべり支承の動的特性に関しては、各種依存性を無視し、静止摩擦係数と動摩擦係数は等しいものと仮定している。図 4 (b) に摩擦係数ごとのすべり変位と等価粘性減衰定数の関係を示す。すべり変位 0.300m で等価粘性減衰定数は、摩擦係数 0.046 では一般的な

図 4 検討対象モデル

表 1 解析諸元

すべり支承 摩擦係数	摩擦力 [kN]	固有 周期 [s]	等価周期 (0.30m 時) [s]	等価粘性 減衰定数 (0.30m 時)[%]	免震層 クリアランス [m]
0.046	13.98	3.47	2.88	20.0	0.30
0.015	4.56	3.47	3.23	8.3	0.30

図 5 解析モデルのモード応答性状

免震構造における減衰定数である 20% になっているが、摩擦係数 0.015 では 8% であり、減衰定数は非常に小さい。

3.2 入力地震動

本論で検討する入力地震動を表 2 に示す。入力地震動には観測波 6 波と、告示スペクトルに各位相特性を与えた模擬地震動 5 波と三の丸波の計 12 波を用いる。観測波のうち El Centro 波、八戸波、Taft 波の 3 波については、入力レベルを中地震に相当するレベル 1 (PGV 0.25m/s)、大地震に相当するレベル 2 (PGV 0.50m/s)、そして巨大地震に相当するレベル 3 (PGV 0.75m/s) の 3 段階に分類する。模擬地震動 5 波をレベル 2、MYG006 波、鷹取波、柏崎波、三の丸波の 4 波は原波を用いてレベル 3 と位置づけた。ただし次節で示す理由からレベル 3 の中でも鷹取波、柏崎波、三の丸波²²⁾の 3 波は巨大地震動と呼称する。なお模擬地震動は、解放工学的基盤での 5% 減衰の加速度応答スペクトルに第 2 種地盤における表層地盤の増幅率 G_s を乗じた加速度応答スペクトルに、各観測地震動の位相特性を与えて作成した²³⁾。

図 6 に目標となる加速度応答スペクトルと作成した模擬地震動 5 波の加速度応答スペクトルを示す。以後、レベル 2 地震動入力を「レベル 2 あるいは Lv.2」、レベル 3 地震動入力を「レベル 3 あるいは Lv.3」と表記する。

以後の検討では、入力レベルごとに該当するすべての地震動に対

表 2 入力地震動一覧

入力地震動		表記					
観測地震動	1940年Imperial Valley地震	El-Centro	NS記録	El-Centro波			
	1968年十勝沖地震	八戸湾事務所	EW記録	八戸波			
	1952年Kern County地震	Taft	EW記録	Taft波			
	2011年東北沖地震	K-net古川	EW記録	MYG006波			
	1995年兵庫県南部地震	JR鷹取駅	強震方向記録	鷹取波			
	2007年新潟県中越沖地震	柏崎	EW記録	柏崎波			
模擬地震動	告示波	El-Centro位相		模擬El-Centro波			
	告示波	八戸位相		模擬八戸波			
	告示波	Taft位相		模擬Taft波			
	1995年兵庫県南部地震	神戸海洋気象台NS記録位相		模擬神戸波			
	1978年宮城県沖地震	東北大建設系1階NS記録位相		模擬東北大波			
	新東海地震模擬地震動EW成分			三の丸波			
地震波	レベル1		レベル2		レベル3		
	PGV [m/s]	PGA [m/s ²]	PGV [m/s]	PGA [m/s ²]	PGV [m/s]	PGA [m/s ²]	
観測波	El-Centro波	0.25	2.53	0.50	5.07	0.75	7.61
	八戸波	0.25	1.25	0.50	2.39	0.75	3.58
	Taft波	0.25	2.49	0.50	4.97	0.75	7.46
	MYG006波	—	—	—	—	0.91	5.72
	鷹取波	—	—	—	—	1.56	7.27
	柏崎波	—	—	—	—	1.09	6.67
模擬波	模擬神戸波	—	—	0.64	6.45	—	—
	模擬八戸波	—	—	0.48	5.87	—	—
	模擬El Centro波	—	—	0.66	5.07	—	—
	模擬Taft波	—	—	0.64	7.45	—	—
	模擬東北大波	—	—	0.74	5.91	—	—
	三の丸波	—	—	—	—	0.51	1.86

図 6 模擬地震動の加速度応答スペクトル

する時刻歴応答解析を行い、入力レベルごとの最大応答値を評価対象とする。なお、時刻歴応答解析には Newmark- β 法を用い、 $\beta=1/4$ 即ち平均加速度法を採用した。

3.3 FDC のないすべり支承免震戸建て住宅の解析結果

FDC を取り付けない場合の、摩擦係数 0.046 と 0.015 の解析結果を表 3 に示す。最大免震層変位に着目すると、レベル 2 の場合は摩擦係数 0.046 では免震層クリアランスの 0.300m 以下に収まっているが、摩擦係数 0.015 では 0.300m 以上の変位が生じている場合もある。またレベル 3 では、摩擦係数 0.046 の Taft 波以外において、最大変位が免震層クリアランス 0.300m を上回っている。一方で最大加速度に着目すると、三の丸波を除く全ての入力波において、摩擦係数 0.015 では摩擦係数 0.046 と比べると最大加速度は小さくなっている。

レベル 3 のうち極大地震動にあたる鷹取波、柏崎波、三の丸波の 3 波における最大免震層変位に着目すると、いずれも摩擦係数 0.015 では免震層クリアランス 0.300m をはるかに超えており、後述する FDC を取り付けただけの場合でも、これらの 3 波で FDC の設計パラメータが決定されてしまい、その他の入力地震動を採用することの意義が損なわれている。

そこで 4 章と 5 章では、観測波のうち鷹取波、柏崎波を除いた 4 波と、模擬波のうち三の丸波を除いた 5 波の計 9 波を用いて、レベ

ル 2、レベル 3 の 2 段階の入力地震動に対する検討を進める。その後 6 章では、極大地震動 3 波も合わせた検討として、表 2 中のすべての地震動を考慮した検討を示す。

3.4 検討する設計変数と設計手法

連結機構摩擦ダンパーの設計においては、ばね剛性 K_d 、最大ダンパー力 F_d 、設定クリアランス L_s の 3 種類の FDC パラメータを決定する必要がある。これらの決定には、パラメトリックスタディを用いることが一般的であり、既往の実験的研究においてもパラメトリックスタディによって FDC パラメータを決めてきた^{15,16)}。しかしながら、一般的な設計での検討を視野に入れると複数の入力地震動に対して、入力レベルに応じた設計条件を満たすような FDC パラメータを 3 つ (5 章で示す 2 段階連結においては 6 つ) 求めることとなり、数多くの数値解析を行う必要があつて膨大な時間と労力がかかる。そこで本論では、FDC パラメータを求めるにあたり最適設計手法を利用することとする。これにより比較的容易かつ解析的に解を求めることが可能となる。最適化法として様々なアルゴリズムが提案されているが、本論文では制約条件付き非線形最適化問題に対する最も有効な数値解析法の一つである逐次 2 次計画法(Sequential Quadratic Programming Method, 以下、SQP 法¹⁹⁾を用いる。なお本論文では、SQP 法のソフトウェアとして DOT²⁴⁾を用いた。

最適設計手法において適用する設計条件に関しては、入力地震動レベルごとに設計クライテリアを設ける。設計クライテリアとしては、(1) 免震層最大変位、(2) 全層における最大加速度、(3) 上部構造の最大層間変形角、の 3 種類を考える。

4. レベル 3 地震動時の免震層過大変位への安全装置としての FDC の適用性

4.1 解析概要

本章では、3 章で示したすべり支承免震戸建て住宅に対して、過大変位に対する安全装置としての FDC 設計を検討する。安全装置として 1 種類の FDC を導入し、レベル 3 に対する最大変位が免震層クリアランス 0.300m 以下になるような FDC パラメータを最適設計手法で求める。表 4 に設計クライテリアを示す。なお本章では免震層変位が極めて大きい構造物の極限状態を想定していることから、最大加速度と最大層間変形角は設計クライテリアの対象外としている。

表 4 を満たす FDC パラメータを求める最適設計問題の定式化は次ページのようになる。また表 5 に最適設計での設計変数の初期値と側面制約条件として、下限値と上限値を示す。表 3 (a) から摩擦係

表 4 安全装置としての FDC に対する設計クライテリア

入力地震動 レベル	最大免震層変位 m	最大床応答加速度 m/s ²	最大層間変形角 rad
レベル 2	—	—	—
レベル 3	0.300	—	—

表 5 設計変数の初期値と側面制約

設計変数	下限値	初期値	上限値	下限値	初期値	上限値
	摩擦係数 0.046			摩擦係数 0.015		
F_d [kN]	10	40	150	10	40	150
K_d [kN/m]	1000	2000	5000	1000	2000	5000
L_s [m]	0.241	0.250	0.300	0.109	0.250	0.300

表 3 すべり支承免震戸建て住宅の解析結果

(a) 摩擦係数 0.046

入力地震動		レベル 1		レベル 2		レベル 3	
		$D_{\max}$ [m]	$A_{\max}$ [m/s ²]	$D_{\max}$ [m]	$A_{\max}$ [m/s ²]	$D_{\max}$ [m]	$A_{\max}$ [m/s ²]
観測波	El-Centro 波	0.041	2.25	0.147	2.52	0.312	2.99
	八戸波	0.036	2.16	0.142	2.27	0.322	2.46
	Taft 波	0.051	2.55	0.160	3.48	0.254	3.58
	MYG006 波	—	—	—	—	0.357	3.30
	鷹取波	—	—	—	—	0.732	3.65
	柏崎波	—	—	—	—	1.256	5.08
模擬波	模擬神戸波	—	—	0.241	3.20	—	—
	模擬八戸波	—	—	0.148	3.03	—	—
	模擬 El Centro 波	—	—	0.138	3.39	—	—
	模擬 Taft 波	—	—	0.210	3.75	—	—
	模擬東北大波	—	—	0.190	3.46	—	—
	三の丸波	—	—	—	—	0.363	1.97

(b) 摩擦係数 0.015

入力地震動		レベル 1		レベル 2		レベル 3	
		$D_{\max}$ [m]	$A_{\max}$ [m/s ²]	$D_{\max}$ [m]	$A_{\max}$ [m/s ²]	$D_{\max}$ [m]	$A_{\max}$ [m/s ²]
観測波	El-Centro 波	0.107	1.00	0.324	1.43	0.527	2.08
	八戸波	0.109	0.82	0.272	1.20	0.414	1.67
	Taft 波	0.085	1.18	0.223	1.61	0.408	2.48
	MYG006 波	—	—	—	—	0.691	2.51
	鷹取波	—	—	—	—	0.874	3.22
	柏崎波	—	—	—	—	1.322	4.75
模擬波	模擬神戸波	—	—	0.362	1.67	—	—
	模擬八戸波	—	—	0.235	1.55	—	—
	模擬 El Centro 波	—	—	0.333	1.82	—	—
	模擬 Taft 波	—	—	0.330	1.50	—	—
	模擬東北大波	—	—	0.279	1.52	—	—
	三の丸波	—	—	—	—	1.107	3.91

数 0.046 の場合にはレベル 2 の最大免震層変位が模擬神戸波での 0.241m であり、FDC はレベル 3 地震動時に始めて作動するように、 L_s を 0.241m より大きいものとする。一方で摩擦係数 0.015 の場合には、表 3 (b) からレベル 2 での最大免震層変位が既に設計クライテリアを超える 0.362m であるため、FDC をレベル 2 地震動時から作動させるものとし、 L_s はレベル 1 の最大免震層変位である八戸波の 0.109m より大きくする。また、本検討では、最大免震層変位が設計クライテリアを満たすような FDC パラメータのうちで、最大加速度が最も小さくなる設計解を求めるものとする。

また表 5 に示す設計変数の初期値に関しては、最適設計問題においての局所最適解しか得られない場合や、初期値によっては設計解が得られない場合があるため、複数の試行によって決定した。なお 5 章と 6 章の最適設計時にも同様に初期値設定にあたって試行錯誤を行っている。

1 段連結最適設計問題（摩擦係数 0.046）			
find	:	F_d, K_d, L_s	
to minimize	:	$A_{\max}$	
subject to	:	$D_{\max}(\text{Lv.3}) \leq 0.300 \text{ m}$	
		$L_s > 0.241 \text{ m}$	
1 段連結最適設計問題（摩擦係数 0.015）			
find	:	F_d, K_d, L_s	
to minimize	:	$A_{\max}$	
subject to	:	$D_{\max}(\text{Lv.3}) \leq 0.300 \text{ m}$	
		$L_s > 0.109 \text{ m}$	

4.2 解析結果

表 6 に最適設計手法により求めた FDC パラメータを示す。すべての FDC パラメータは、側面制約とは異なる値となっている。

表 7 に各最大応答値が生じた地震動の一覧を、図 7 に最大応答値に関する FDC の有無による違いを示す。なお、以後の図中表記において、最大床応答加速度は最大加速度と簡略化して示す。摩擦係数 0.015 の最大加速度以外では、レベル 3 の MYG006 波によって各最大応答値が決定されている。

図 7 の最大応答値に着目すると、FDC によって両摩擦係数ともに最大免震層変位は設計クライテリアの 0.300m 以下になっている。摩擦係数 0.046 では、レベル 3 で初めて FDC が作動してレベル 3 における最大応答値に差が生じているのに対して、摩擦係数 0.015 で

表 6 1 段連結時の最適な FDC パラメータ

摩擦係数	F_d [kN]	K_d [kN/m]	L_s [m]
0.046	72.8	2706.2	0.25
0.015	47.2	4861.7	0.12

表 7 FDC がある場合の各最大応答値が生じた地震動

摩擦係数	0.046	0.015
最大免震層変位	MYG006波(レベル3)	MYG006波(レベル3)
最大層間変形角	MYG006波(レベル3)	MYG006波(レベル3)
最大加速度	MYG006波(レベル3)	模擬Taft 波(レベル2)

は前述のようにレベル 2 から FDC が作動しているため、レベル 2 から最大応答値は FDC の有無によって異なっている。

レベル 3 での最大層間変形角と最大床応答加速度に着目すると、どちらの摩擦係数でも FDC がある場合には、FDC がない場合より増大している。また、FDC がある場合の摩擦係数 0.046 と摩擦係数 0.015 での応答値はほぼ等しい。一方で、レベル 2 の最大層間変形角と最大床応答加速度に着目すると、FDC なしでは摩擦係数 0.046 よりも摩擦係数 0.015 のほうが小さいが、FDC がある場合には摩擦係数 0.015 の応答値は摩擦係数 0.046 の 2 倍になっている。以上か

図 7 最大応答値の比較

図 8 レベル 3 地震動入力時の 1 段連結時の応答時刻歴

ら、FDCはレベル2から作動させる必要があり、レベル2から最大層間変形角と最大床応答加速度の両方が増大する摩擦係数0.015よりも、レベル3の応答のみが増大する摩擦係数0.046のほうが優れていることがわかる。

図8にレベル3地震動の最大免震層変位が生じているMYG006波において、連結して最大床応答加速度が生じた時刻周辺の応答時刻歴を示す。摩擦係数0.046では、92秒付近でのFDC連結直後に床応答加速度が大きく増大し、最大床応答加速度になっている。これに対して摩擦係数0.015では、61.5秒でFDCが連結し、床応答加速度は増大しているが、最大床応答加速度と最大免震層変位は93秒付近で生じている。摩擦係数0.046では、92秒における最大免震層変位を抑制するためのストッパーとして機能しているのに対して、摩擦係数0.015では92秒付近での最大免震層変位を、さらに94秒以降での過大変位を抑制するための減衰要素として作用しているものと考えられる。

なお、免震層と擁壁との衝突時に発生する最大床応答加速度に関する検討は、本論では免震戸建て住宅の擁壁モデル化などは本論の論旨とは異なることから、行っていない。ただし、免震層と擁壁の衝突に関する既往研究⁸⁾において、衝突時には上部構造の床応答加速度が 10m/s^2 を超えることが示されており、図7の結果は衝突時よりは床加速度応答が小さく抑えられていると考えられる。

4.3 設計条件の変動と応答値の変動

前節の最適設計条件に対して、FDCパラメータが変動した場合の応答値を考察する。考察には、表6で示した最適なFDCパラメータに対して F_d と K_d をそれぞれ単独に $\pm 10\%$ 変動させた場合を考える。

表8にFDCパラメータが最適値から変動した場合の最大応答値を示す。両摩擦係数ともに、最適値では設計条件である最大免震層変位0.300mを満たしているが、最適値よりもFDCパラメータを小さくした $0.9K_d$ 、 $0.9F_d$ では最大免震層変位が0.300mを超えており、設計条件を満たしていない。一方でFDCパラメータを最適値よりも大きくした $1.1K_d$ 、 $1.1F_d$ では、最大加速度が最適値の場合よりも小さくなっており、最適設計手法で得られたFDCパラメータが設計条件を満たしつつ最大加速度を最も抑制していることがわかる。

表8 最適なFDCパラメータを変動させた時の最大応答値

(a) 摩擦係数0.046						
応答値	FDC なし	FDCあり				
		最適	$0.9K_d$	$0.9F_d$	$1.1K_d$	$1.1F_d$
最大免震層変位[m]	0.357	0.300	0.301	0.303	0.299	0.297
最大加速度[m/s ²]	3.297	7.049	6.878	6.585	7.208	7.485
(b) 摩擦係数0.015						
応答値	FDC なし	FDCあり				
		最適	$0.9K_d$	$0.9F_d$	$1.1K_d$	$1.1F_d$
最大免震層変位[m]	0.691	0.300	0.306	0.309	0.296	0.292
最大加速度[m/s ²]	2.510	6.657	7.015	6.526	7.143	7.663

表9 2段階連結の設計クライテリア

入力地震動 レベル	最大免震層変位	最大床応答加速度	最大層間変形角
レベル2	m	m/s ²	rad
レベル2	—	3.50	1/200
レベル3	0.300	—	1/100

5. 2つの入力地震動レベルに対する設計へのFDCの適用性

5.1 解析概要

本章では、レベル2とレベル3の2つの入力地震動に対してそれぞれ段階的に設計クライテリアを設けて、両方を満足する設計をするために2種類のFDC利用を想定する。FDCは、レベル2に1種類目のFDC(FDC1)を作動させ、レベル3に2種類目のFDC(FDC2)を作動させることとする。設計クライテリアは表9に示すが、2種類のFDCによるきめ細かな設計となっていることを考慮して、4章と比べると床応答加速度と層間変形角に関しても設計クライテリアを設け、より厳しい条件を課している。

この2種類の設計クライテリアを有する最適設計問題を緩和するために、図9に示す2段階最適設計手法を用いる^{20,21)}。2段階最適設計法においては、主問題を以下に示す2つの最適設計問題で定式化する。それぞれの問題に対して表10、表11のように側面制約を設ける。このような主問題の2段階化は実務設計において、1段階目の結果を精査した上で、その結果を受けて2段階目を検討すること

図9 2段階最適設計のフローチャート

第1段階目最適設計問題（レベル2に対する設計）

$$\begin{aligned}
 &\text{find} && : F_{d1}, K_{d1}, L_{s1} \\
 &\text{to minimize} && : D_{\max}(\text{Lv.2}) \\
 &\text{subject to} && : A_{\max}(\text{Lv.2}) \leq 3.5 \text{ m/s}^2 \\
 &&& : R_{\max}(\text{Lv.2}) \leq 1/200 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

表10 第1段階目最適設計問題の設計変数の初期値と側面制約

設計変数	下限値	初期値	上限値
F_d [kN]	5	15	50
K_d [kN/m]	500	2000	4000
L_s [m]	$D_{\max}(\text{Lv.2})$	0.110	0.250

第2段階目最適設計問題（レベル3に対する設計）

$$\begin{aligned}
 &\text{find} && : F_{d2}, K_{d2}, L_{s2} \\
 &\text{to minimize} && : A_{\max}(\text{Lv.3}) \\
 &\text{subject to} && : D_{\max}(\text{Lv.3}) \leq 0.300 \text{ m} \\
 &&& : R_{\max}(\text{Lv.3}) \leq 1/100 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

表11 第2段階目最適設計問題の設計変数の初期値と側面制約

設計変数	下限値	初期値	上限値
F_d [kN]	5	15	50
K_d [kN/m]	100	500	2000
L_s [m]	$D_{\max}(\text{Lv.3})$	0.250	0.300

とに対応している。側面制約としての下限値と上限値については、 F_d は第1段階目と第2段階目で同じ条件とした。一方で K_d は、第2段階目においてはレベル3での連結時に生じる加速度の増大とそれに伴う上部構造の層間変形角の増大を緩和するために、第1段階目よりも小さな値とした。

5.2 解析結果

表12に最適設計手法で得られたFDCパラメータを、図10に地震入力レベルごとの最大応答結果を、表13に有効制約条件をそれぞれ示す。図10にはレベル3でのFDC2の効果を検討する参考結果として、レベル3でFDC1のみ作動した場合の結果も併記する。

両摩擦係数ともにFDCがない場合、最大免震層変位が設計クライテリアを満たしていない。FDC1のみが作動した場合にも、レベル3での最大免震層変位は0.300mを超えており、設計クライテリアを

表12 2段連結時の最適なFDCパラメータ

μ		F_d [kN]	K_d [kN/m]	L_s [m]
0.046	FDC1	9.2	1044.4	0.170
	FDC2	44.0	1120.9	0.220
0.015	FDC1	20.0	1954.3	0.110
	FDC2	19.4	479.8	0.221

(a) 摩擦係数0.046

(b) 摩擦係数0.015

図10 2段連結時の解析結果

表13 2段連結時の有効制約条件

(a) 摩擦係数0.046

応答値	レベル2		レベル3	
	地震動	応答箇所	地震動	応答箇所
免震層変位	Taft模擬波	免震層	Taft波	免震層
層間変形角	神戸模擬波	2層	Taft波	2層
加速度	Taft模擬波	頂部	Taft波	頂部

(b) 摩擦係数0.015

応答値	レベル2		レベル3	
	地震動	応答箇所	地震動	応答箇所
免震層変位	Taft模擬波	免震層	MYG006波	免震層
層間変形角	神戸模擬波	2層	Taft波	2層
加速度	東北大模擬波	頂部	Taft波	頂部

満たしていない。一方でFDC1とFDC2の両方が作動した場合には、レベル3の最大加速度はどちらの摩擦係数でもFDCなしと比べて70%程度増大しているが、表9の設計クライテリアを満たしている。

有効制約条件をみると、各応答値に対して複数の入力地震動が関係しているが、最適設計手法を利用することで複数の入力地震動と複数の設計クライテリアにも対応した設計ができている。

図10のFDC1+FDC2の結果を摩擦係数ごとにみると、摩擦係数0.046ではレベル3には最大応答値が設計クライテリアとほぼ等しくなっているのに対して、摩擦係数0.015ではレベル3の最大層間変形角が設計クライテリアよりも3割程度小さくなっており、摩擦係数0.015のほうが余裕のある設計であるといえる。レベル3の最大加速度を比較しても、摩擦係数0.046よりも摩擦係数0.015のほうが22%小さくなっており、摩擦係数0.015のほうが免震効果が大きな設計となっている。

なお、図10におけるFDCなしおよびFDC1で、最大免震層変位が0.300m以上のものにおいては、4.2で述べたように本論では衝突を取り扱っていないため、実際に衝突を考慮した場合の最大層間変形角と最大加速度はより大きいと考えられ、図中の結果は参考にしたものである。

5.3 最大免震層変位が生じている近傍の時刻歴

図11に摩擦係数0.015で最大免震層変位を決定付けているMYG006波入力時の応答時刻歴を示す。図中のFDC1のみは、2段階最適設計で求められたFDC1のみが作動した場合、FDC1+FDC2はFDCが2段とも作動した場合の結果を示す。61.5秒においてFDC1が作動し、作動した直後の床応答加速度と層間変形角が、FDCなしと比べると2.5倍程度に増大しているものの、それ以後の免震層変位は低減している。92.1秒でのFDC2作動後の93秒で、FDC1のみでは制御できなかった免震層変位を0.300mに抑制しており、FDC2

図11 MYG006波(レベル3)入力時の応答時刻歴(摩擦係数0.015)

がストッパーとして作動していることがわかる。ただし、FDC2 の作動によっても床応答加速度と層間変形角は増加しているが、その増加量は 15%程度とわずかである。

5.4 レベル 2 加速度応答に関する感度分析

5.2 での結果では、摩擦係数 0.046 と 0.015 の両方で設計クライテリアを満たす設計解が求まったものの、摩擦係数 0.015 のほうが免震効果が大きな設計であることが示された。本項では、2 段階最適設計における設計クライテリアのうち、図 10 でも示されているように両摩擦係数において有効制約条件となっているレベル 2 の最大床応答加速度を変化させて最適解を求めていくことで、最適解の感度分析を行う。ここで検討する最適設計問題は次ページに示す。感度分析として、レベル 2 の最大床応答加速度の制約条件を 2.5～4.0m/s² の範囲内で 0.1m/s² ずつ刻んで、それぞれの最大応答結果を考察する。

図 12 に感度分析結果を示す。感度分析結果のうち、設計解が求

第 1 段階目最適設計問題(レベル 2 に対する設計)

find : F_{d1}, K_{d1}, L_{s1}
to minimize : $D_{\max}$ (Lv.2)
subject to : $A_{\max}$ (Lv.2) $\leq 2.5 \sim 4.0$ m/s²
 $R_{\max}$ (Lv.2) $\leq 1/200$ rad

第 2 段階目最適設計問題(レベル 3 に対する設計)

find : F_{d2}, K_{d2}, L_{s2}
to minimize : $A_{\max}$ (Lv.3)
subject to : $D_{\max}$ (Lv.3) ≤ 0.300 m
 $R_{\max}$ (Lv.3) $\leq 1/100$ rad

図 12 レベル 2 最大応答加速度の制約条件と応答値

表 14 加速度制約条件ごとの有効制約条件

加速度制約条件	摩擦係数0.046		摩擦係数0.015	
	レベル2	レベル3	レベル2	レベル3
2.5			加速度	免震層変位 層間変位
2.6			加速度	免震層変位
2.7			加速度	免震層変位
2.8				免震層変位
2.9				免震層変位
3			加速度	免震層変位
3.1			加速度	免震層変位
3.2			加速度	免震層変位
3.3			加速度	免震層変位
3.4			加速度	
3.5	加速度	免震層変位	加速度	免震層変位
3.6	層間変位	免震層変位	加速度	
3.7	層間変位	免震層変位	加速度 層間変位	免震層変位
3.8	層間変位	免震層変位	層間変位	免震層変位
3.9	層間変位	免震層変位	層間変位	免震層変位
4	層間変位	免震層変位	層間変位	免震層変位

まらなかった場合にはプロットを記入していない。摩擦係数 0.015 では、レベル 2 の加速度制約条件を 2.5m/s² まで厳しくしても解を見つけることができた。これに対して、摩擦係数 0.046 では、レベル 2 の加速度制約条件が 3.5 m/s² 未満では設計クライテリアを満たす解が見つからなかった。

加速度制約条件ごとの有効制約条件を表 14 に示す。レベル 3 地震動入力時の有効制約条件はほとんどの場合で免震層変位であり、免震層変位が最も厳しい条件であることがわかる。レベル 2 地震動入力時には、加速度制約条件の値が大きい 4.0m/s² 時には層間変位が有効制約条件となっているが、加速度制約条件が小さくなる、すなわち制約が厳しくなるに従って床応答加速度が有効制約条件となっており、摩擦係数 0.046 時には加速度制約条件が 3.4m/s² 以下ではレベル 2 の加速度制約条件を満たすことができないため、条件を満たす実行可能解が得られなかったことがわかる。

以上から、2 段連結においてレベル 2 により厳しい最大床応答加速度の設計条件を設ける場合には、摩擦係数 0.015 の方が最大応答値は小さくなることが明らかになった。

6. 極大地震動を考慮した FDC の設計

本章では、4.5 章で検討しなかった極大地震動である鷹取波、柏崎波、三の丸波も含めて検討する。

6.1 解析概要

本章での検討は、1 段連結に対しては 4 章の結果をふまえて摩擦係数を 0.046 とし FDC をレベル 3 でのみ作動させる場合を、2 段連結に対しては 5 章の結果をふまえて摩擦係数を 0.015 としレベル 2 とレベル 3 の 2 段階の最適設計を検討する場合の 2 通りとする。

設計条件については、1 段連結に対しては 4 章で示した設計条件

第 2 段階目最適設計問題(レベル 3 に対する設計)

find : F_{d2}, K_{d2}, L_{s2}
to minimize : $A_{\max}$ (Lv.3)
subject to : $D_{\max}$ (Lv.3) ≤ 0.300 m

と同様のものとしたが、2 段連結に対しては 5.1 で示した設計条件では実行可能解が得られなかったため、以下に示すようにレベル 3 に対する層間変位に関する制約条件を無くして設計した。

6.2 解析結果

表 15 に最適設計手法によって得られた最適な FDC パラメータを示す。1 段連結に関して表 6 の 4 章での検討結果と比べると、 F_d では 1.5 倍、 K_d では 3.9 倍に増大しており、極大地震動を止めるために大きなダンパー力が必要であることがわかる。2 段連結に関しても表 12 の 5 章の結果と比べると、FDC1 の諸元は同程度であるが、FDC2 が F_d では 7.4 倍、 K_d では 7.0 倍になっている。

表 15 極大地震を考慮した場合の最適パラメータ

	F_d [kN]	K_d [kN/m]	L_s [m]
1段連結	110.9	18992.4	0.254
2段連結			
FDC1	20.0	1954.3	0.110
FDC2	142.6	3350.9	0.258

図 13 に 1 段連結と 2 段連結の最大応答値を示す。1 段 2 段両方ともに、設計条件に設定していなかったレベル 3 の最大床応答加速度は 1G を超えているが、極大地震動に対応した FDC パラメータを用いてもレベル 2 の最大加速度と最大層間変形角を設計条件の範囲内に制御しつつ、レベル 3 の最大免震層変位に対する設計条件も満たしている。1 段連結と 2 段連結を比較すると、レベル 3 の最大床応答加速度について 2 段連結のほうが 1 段連結よりも 8% 小さいが、レベル 3 の最大層間変形角では 2 段連結のほうが 1 段連結よりも

15% 大きくなっている。表 15 に示す FDC パラメータのうち K_d に着目すると、2 段連結時の FDC1 と FDC2 では 1 段連結時のそれぞれ 10%、18% と非常に小さいため、2 段連結における連結作動時の床応答加速度増大が 1 段連結に比べて軽微となるため、最大床応答加速度は 2 段連結時のほうが小さくなっている。これに対して FDC パラメータのうち F_d に着目すると、2 段連結の FDC2 台分のダンパー力合計のほうが 1 段連結のダンパー力よりも 47% 大きくなっているため、2 段連結のほうが 1 段連結よりも上部構造に大きなせん断力が作用し、最大層間変形角は大きくなったものと考えられる。

ただし、免震効果と関連性が高い最大床応答加速度に着目すると、1 段連結よりも 2 段連結のほうが 1 割程度小さくなっており、摩擦係数 0.015 で 2 段連結のほうが免震効果が高い設計であるといえる。

表 16 に各条件における有効制約条件を示す。1 段連結に関しては鷹取波によってすべての有効制約条件が決まっているが、2 段連結では最大免震層変位と最大床応答加速度は Taft 波で、最大層間変形角は柏崎波で決まっている。

6.3 最大免震層変位が生じている近傍の時刻歴

図 14 に鷹取波入力時の 1 段連結と 2 段連結における最大応答値周辺の時刻歴を示す。両方ともに免震層変位の最大値は 6.1 秒付近の振幅で生じており、0.300m 以下に収まっている。連結のタイミングは、1 段連結では 3.2 秒での 1 段連結に対して、2 段連結では 2.3 秒で FDC1 が連結し、3.3 秒で FDC2 が連結している。免震層床応答加速度の最大値は 1 段連結では連結直後に生じているが、2 段連結では連結直後には加速度応答は大きくは増大していない。

7. まとめ

本論では免震構造物に対して、中地震動入力から極大地震動入力までを想定した場合の、地震入力レベルごとの設計を実現するために、連結機構摩擦ダンパーを利用した設計法を提案し、すべり支

図 13 極大地震時の最大応答値

表 16 極大地震時の有効制約条件

応答値	1段連結(摩擦係数0.046)		2段連結(摩擦係数0.015)	
	地震動	応答箇所	地震動	応答箇所
免震層変位	鷹取波	免震層	Taft波	免震層
層間変形角	鷹取波	2層	柏崎波	2層
加速度	鷹取波	免震層	Taft波	3層

図 14 鷹取波入力時の最大応答値周辺の時刻歴（点線丸は最大値）

免震戸建て住宅を一例に最適設計手法を利用した設計例を示して、その設計可能性を検討した。検討例は一例に過ぎないが、例題以外の免震戸建て住宅に対しても本稿で示した FDC とその設計法を適用することで、地震入力レベルに応じた免震設計が可能になると期待される。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 連結機構摩擦ダンパーを 1 段で用いることで、主に過大な免震層変位に対するストッパーとしての設計例を示した。異なった摩擦係数を有する 2 種類のすべり支承に対して最適設計を利用して検討した結果、標準摩擦型すべり支承のほうが低摩擦型すべり支承に比べてレベル 2、3 時の最大加速度が小さいことを示した。すなわち連結機構摩擦ダンパーをストッパーとして用いる場合には、標準摩擦型すべり支承のほうがより性能の高い免震構造を実現できることになる。
- 2) 2 種類の連結機構摩擦ダンパーを 2 段で用いて、レベル 2 とレベル 3 の 2 つの地震入力レベルに応じた設計クライテリアを設定し、2 段階最適設計を用いた設計例を示した。前述の 2 種類のすべり支承に対して検討した結果、低摩擦型すべり支承のほうがより厳しい設計クライテリアに対してよい性能を示した。さらに感度分析から、2 段連結を用いる場合には、低摩擦型すべり支承のほうが標準摩擦型すべり支承と比べて制約条件に対する設計可能範囲が広いことを示した。
- 3) 極大地震動に対する設計を、1 段連結付き標準摩擦型すべり支承と 2 段連結付き低摩擦型すべり支承の 2 種類の免震構造に対して検討した。その結果、両免震構造ともに設計条件を満たすことが可能であること、2 段連結付き低摩擦型すべり支承を用いた場合のほうが、最大床応答加速度が小さく、免震効果が高いことを明らかにした。
- 4) 上記 3 項目を実用面からまとめると、一般的に広く用いられている標準型すべり支承を有する免震戸建て住宅の補強としては 1 段連結を、性能がより高い新築免震戸建て住宅を設計する場合には、2 段連結付き低摩擦型すべり支承を用いることが望ましいといえる。

謝辞

本研究では、愛知県設計用入力地震動研究協議会の作成波 C-SAN-EW（三の丸波）を利用させていただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会:2009 年度免震制振建物データ集計結果、MENSIN、No.69、pp.38-42、2010.8
- 2) 竹内貞光、久保孝治、平野茂、岡村光裕、花井勉、坂本功：木造免震住宅の実大振動実験 その 6 ストッパーの効果、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.725-726、1999.9.
- 3) 中安誠明、中島正愛：擁壁に衝突する免震建物の応答特性、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.477-478、2002.8.
- 4) 中安誠明、中島正愛：過大地震下における免震建物の応答と損傷、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.441-442、2003.9.
- 5) 花井勉、福和伸夫、森保宏、皆川隆之：免震層変位を制限した戸建て免震住宅の耐震等級対応法とライフサイクルコスト評価、日本建築学会構造系論文集、第 572 号、pp.89-96、2003.10.
- 6) 柏尚稔、中安誠明、中島正愛：大地震下における免震建物の応答と損傷特性 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.393-396、2004.8.

- 7) 飯場正紀、緑川光正、花井勉、皆川隆之：変位抑制部材を用いた免震層衝突時における免震住宅の地震時応答 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.425-428、2004.8.
- 8) 三輪田吾郎、小巻潤平、佐藤浩太郎、佐野剛志、勝俣英雄、多幾山法子、林 康裕：実大免震建物の擁壁衝突実験とそのシミュレーション解析、日本建築学会構造系論文集、Vol.76、No. 663、pp.899-908、2011.5.
- 9) 飯場正紀、小豆畑達哉、井上波彦、平野茂：2011 年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の地震時挙動 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.511-514、2012.9.
- 10) 根本真孝、五十子幸樹、池永昌容、井上範夫：戸建住宅における性能可変オイルダンパーを用いた免震システムの設計法、日本建築学会構造系論文集、Vol.76、No.660、pp.291-299、2011.2.
- 11) 井上範夫、五十子幸樹：建築物の変位制御設計 地震に対する免震・長周期建物の設計法、丸善出版、2012.
- 12) マテオ・アライ・アルベル、趙自由、堀則男、五十子幸樹、井上範夫、中田信治：すべり支承免震構造の過大応答変形抑制に関する実験的研究、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B2、pp.883-884、2009.8.
- 13) 堀則男、趙自由、マテオ アライ アルベル、井上範夫：連結機構摩擦ダンパーによる免震試験体の地震時過大変形抑制 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.885-888、2009.8.
- 14) 堀則男、趙自由、井上範夫：連結機構摩擦ダンパーを用いた 3 層フレーム免震試験体の地震時過大変形抑制実験 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.363-366、2010.9.
- 15) 福見祐司、全昌龍、幸山寛和、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：連結機構摩擦ダンパーを用いたすべり支承免震構造の変位抑制に関する検討 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.447-450、2011.8.
- 16) 幸山寛和、全昌龍、福見祐司、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：連結機構摩擦ダンパーを用いた免震構造の巨大地震時過大変位制御設計、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.455-456、2011.8.
- 17) 福見祐司、全昌龍、池永昌容、五十子幸樹、井上範夫：二段階最適設計法による多段方式連結機構摩擦ダンパー付き免震住宅の設計 その 1、その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、pp.523-526、2012.9.
- 18) 五十子幸樹、山川誠、上谷宏二：数理的設計手法に基づく建築構造設計と最適設計感度分析、日本建築学会構造系論文集、第 599 号、pp.87-94、2006.1.
- 19) 福島雅夫：数理計画入門 システム制御情報ライブラリー、朝倉書店、1996.
- 20) 中村恒善、小阪郁夫：弾塑性骨組の指定設計用変形指標に対する 2 段階地震応答制約設計法、日本建築学会構造系論文集、第 439 号、pp.89-101、1992.9.
- 21) 吉富信太、山川誠、上谷宏二：二段階緩和法に基づく鋼構造骨組の最適離散断面選択法、日本建築学会構造系論文集、第 586 号、pp.95-100、2004.12.
- 22) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成—想定地震による地震動予測—改訂版、2005.
- 23) 改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景—免震構造物の構造関係規定と免震部材の品質—、独立行政法人建築研究所、2001.8.
- 24) DOT Design Optimization Tools User's Manual Version 5.0, Vanderplaats Research & Development, Inc., 2001.

(2013 年 2 月 6 日原稿受理、2013 年 4 月 19 日採用決定)