

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月21日現在

機関番号：32682

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760426

研究課題名（和文） 免震部材と地震動の多様性を考慮した免震建物の応答構造と設計用地震荷重に関する研究

研究課題名（英文） A study on earthquake response and vertical distribution of seismic design load for seismically isolated buildings corresponding to diversity of seismic isolation devices and earthquake ground motion

研究代表者

小林 正人（KOBAYASHI MASAHIRO）

明治大学・理工学部・准教授

研究者番号：50373022

研究成果の概要（和文）：本研究では履歴系や流体系などの多様な免震部材に対応する新たな免震建物の設計用地震荷重分布を提案した。また、免震建物の地震荷重分布の特性を、両端自由振動モードを用いたモーダルアナリシスによって分析した。さらに、様々な解析モデルに対する設計用地震荷重分布の適用性を検証した。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a vertical distribution of seismic design load of seismically isolated buildings corresponding to diversity of seismic isolation devices such as hysteretic dampers and/or velocity-dependent dampers. And, the distribution of seismic load is explained by non-linearity modal analysis with free-free vibration mode. In addition, it is confirmed that this proposed method adapts to various model of seismically isolated buildings.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：免震、地震荷重、建築構造、構造工学、免震係数、モーダルアナリシス

1. 研究開始当初の背景

免震建物は兵庫県南部地震(1995)以降、地震発生下での有効性が認知され、急速に建設数を増やしており、日本は国際的に最も免震建物が普及している国となっている。また、従来型の積層ゴム支承に加えて、転がり支承や低摩擦すべり支承など 1000 トンを超える荷重支持能力や引抜き力に抵抗する機構を兼ね備えた新しい免震デバイスが開発され、

免震構造のシステム構成は近年多様化している。2000年には免震建築物に関する技術的基準（建設省告示 2009 号）が制定され、告示の適用範囲内であれば時刻歴応答解析によらない構造計算が可能であり、免震告示に基づく免震建物も近年増加している。

一方で、この免震告示の問題点が指摘されるようになり、特に設計用せん断力係数の計算方法が地震応答を過小評価することが懸

念されている。そのため、せん断力係数分布に影響する構造パラメータの再評価や設計用せん断力係数分布の新提案が行われているが、設計パラメータの煩雑さ、設計用としての簡潔性・利便性を欠くため実用に供されていない実情がある。

2. 研究の目的

免震建物の設計用せん断力係数分布の提案を最終目的として、地震応答構造の分析を行う。地震応答構造の分析とは、免震構造の特徴である剛体モードと上部構造の応答を支配する高次モードの影響度（全体応答への寄与率）の評価である。分析には、Skinner のモード掃引法を援用し、応答構造を支配する主要パラメータの抽出を行う。さらに、免震デバイスと上部構造の構造特性を相対的に評価し得る指標を考案し、高次モード応答によるせん断力係数の応答増幅との関係を定量化する。定量化に際しては、地震動特性の影響を考慮し、これらの結果から設計式の導出を図る。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために次の4つの検討を行う。

(1) 各種影響因子を考慮した時刻歴応答解析

免震建物の設計クライテリアとなる免震層の最大応答変位と上部構造のせん断力係数に対する各種影響因子（上部構造、免震デバイスおよび地震動特性）の分析を行う。

(2) 地震応答構造の分析

地震応答解析結果に対して、両端自由振動モードを用いたモード掃引法を適用して応答構造の分析（モーダルアナリシス）を行う。

(3) 免震建物の構造特性指標の構築

免震デバイスと上部構造の構造特性を相対的に評価し得る構造特性指標を考案する。

(4) 設計用せん断力係数の提案

設計用せん断力係数分布の算定式を誘導する。構造特性指標と高次モードによる応答増幅の関係を定量化し、最終的に日本建築学会免震構造設計指針と同型の設計式を提案する。

4. 研究成果

本研究では、高次モード応答を十分に評価し得る10質点系せん断モデル（免震建物モデル）を用いて、建物固有周期やダンパーの特性、入力地震動をパラメータとした多数の時刻歴応答解析を実施した。その解析データに基づいて以下に示す成果を得た。

(1) 設計用地震荷重分布の提案式

① 免震告示による評価法

免震告示では、建物各階の設計用せん断力係数分布 α を次式で与えている。

$$\alpha_i = \gamma \cdot \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (1)$$

ここに、 γ ：免震部材の力学特性のばらつき等の影響を考慮する係数、 Q_{iso} ：免震層の最大応答せん断力、 M ：上部構造の総質量、 g ：重力加速度、 A_i ：建築基準法の基準せん断力係数分布、 Q_h 、 Q_v 、 Q_e ：それぞれ、履歴型ダンパー、速度依存型ダンパー、弾性支承が免震層の基準変位時に負担するせん断力

(1)式は、弾性支承の負担せん断力係数は上部構造で増幅せず、上部構造の応答増幅は専らダンパーに支配されるという知見に基づき、ダンパーの負担分に対し高さ方向増幅を A_i 分布で評価した簡便な評価方法であり、履歴型のみを考慮した場合は、図1の分布となる。

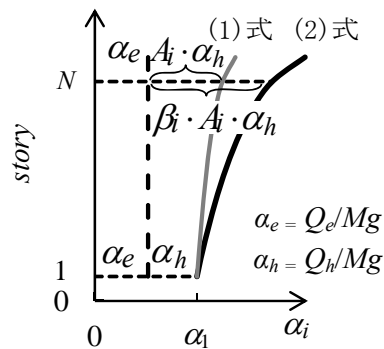


図1 設計用せん断力係数分布

② 本研究による提案法

本研究では、免震告示や日本建築学会免震構造設計指針の評価法の構成を踏襲し、 A_i 分布による応答増幅作用を補正する増幅率 $\beta_{eq,i}$ を導入したせん断力係数分布 α_i を(2)式で提案する。

$$\alpha_i = \frac{Q_{iso}}{M \cdot g} \cdot \frac{A_i \cdot \beta_{eq,i}(Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \quad (2)$$

増幅率 $\beta_{eq,i}$ は、履歴型および速度依存型ダンパーによる応答増幅の程度を表し、(3)式で求められる。 N は上部構造の層数である。

$$\beta_{eq,i} = \left(\frac{\bar{\beta}_{eq} - 1}{N - 1} \right) i + \frac{N - \bar{\beta}_{eq}}{N - 1} \quad (3)$$

$\bar{\beta}_{eq}$ は直線に近似した $\beta_{eq,i}$ 分布の最上層の値であり、 $\bar{\beta}_{eq}$ を免震の隔絶度を表す指標である等価免震係数 I_{eq} で評価するのが本評価式の特徴である。しかし、この I_{eq} は、skinnerらの免震係数 I の定義とは異なることに注意されたい。

$$\bar{\beta}_{eq} = \frac{5.0}{I_{eq}^2} + 0.6 \quad (\bar{\beta}_{eq} = 3.0 \text{ を上限}) \quad (4)$$

$$I_{eq} = T_{eq}/T_0 \quad (5)$$

ここに、 T_{eq} ：等価免震係数算定のための免震層のみかけの初期剛性 K_{eq} に対する等価周期 ($=2\pi\sqrt{M/K_{eq}}$)、 T_0 ：上部構造基礎固定時の1次固有周期

$$K_{eq} = k_s \cdot \frac{Q_h}{Q_h + Q_v} + k_f \quad (6)$$

ここに、 k_s ：履歴型要素の初期剛性、 k_f ：弾性支承の剛性

(2)式から(6)式で算出する設計用せん断力係数分布の計算フローを図2に示す。この(6)式は、skinnerらの免震係数 I と異なり、履歴型と速度依存型のダンパーの負担せん断力に応じて履歴型の剛性を低減することで速度依存型の効果を取り入れた等価免震係数 I_{eq} を算出するための“みかけの初期剛性”である。ただし、(6)式では速度依存型に対し履歴型が支配的となるケースにおいて、地震応答を過大評価する場合もある。これをより適切に評価するためには、等価免震係数 I_{eq} の詳細計算法を用いる必要がある。

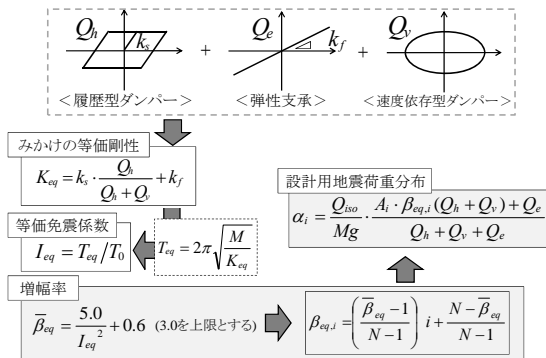


図2 設計用せん断力係数分布の算定フロー

③提案式の特徴

(4)式における $\bar{\beta}_{eq}$ と I_{eq} の関係式は、図3に示す時刻歴応答解析から得られた $\bar{\beta}_{eq}$ の平均値を捉えるように決定している。

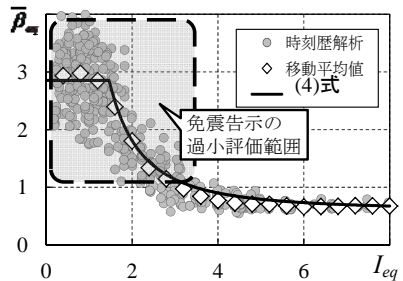


図3 等価免震係数 I_{eq} と $\bar{\beta}_{eq}$ の関係

$\bar{\beta}_{eq}$ は、 I_{eq} の減少に伴い増加し、入力地震動によるばらつきも大きくなる。 $I_{eq} \leq 3.5$ の領域は免震告示(1)式が地震応答を過小評価

する可能性が高い範囲を示しており、一方、 $3.5 \leq I_{eq}$ では A_i 分布による高さ方向への応答増幅を低減させる領域も存在することを示している。

免震建物において時刻歴応答解析の結果から認識されてきた“履歴型のみ”に比べ速度依存型を併用した場合には、上部構造での応答が低減される”という知見に対して、導入するダンパー量や上部構造との周期比で等価免震係数 I_{eq} を算出することで上部構造での応答増幅作用の変動(増幅率 $\beta_{eq,i}$)を連続的かつ定量的に捉えることができる(図4)。これにより設計時に免震部材の特性を容易にかつ適切に評価した地震荷重の分布形を設定することが可能となる。

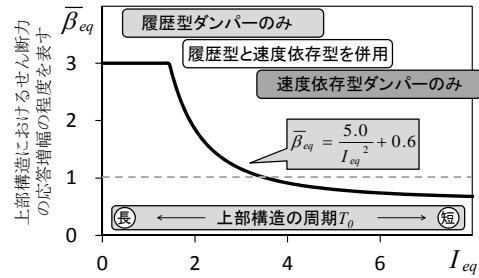


図4 $\bar{\beta}_{eq}$ と I_{eq} を用いた提案式の特徴

(2)地震応答構造の分析

Skinnerらの両端自由振動モードを用いた非線形モーダルアナリシスにより、せん断力係数分布の応答増幅に及ぼす高次モード応答の影響度を把握し、等価免震係数 I_{eq} に対する増幅率 $\beta_{eq,i}$ の変動メカニズムおよび高次モード応答の発生要因を分析した。

①両端自由振動モードによるモード分析

両端自由振動モードは、免震層の剛性を0とした場合の振動モードであり、免震建物の振動特性を包括的に表現するのに有効とされる。上部 N 質点の免震建物について、免震層の剛性を0とした剛性行列 \mathbf{K}_{FF} 、質量行列 \mathbf{M} とすれば両端自由振動モードの s 次固有ベクトル ${}_s \mathbf{u}_{FF}$ と固有振動数 ${}_s \omega_{FF}$ の関係は次式となる。

$$\mathbf{K}_{FF} \cdot {}_s \mathbf{u}_{FF} = {}_s \omega_{FF}^2 \cdot \mathbf{M} \cdot {}_s \mathbf{u}_{FF} \quad (7)$$

免震層の抵抗力 Q_{iso} 、地動加速度 \ddot{y}_g とすると、相対変位ベクトル \mathbf{y} についての振動方程式は次式となる。

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_{FF} \cdot \mathbf{y} + (\mathbf{0}_{n-1} \quad Q_{iso})^T = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{1} \cdot \ddot{y}_g \quad (8)$$

ここに、 \mathbf{C} ：減衰行列、 $\mathbf{0}_n$ ： n 次のゼロベクトル、 $\mathbf{1}$ ：要素が全て1の列ベクトル

固有ベクトル ${}_s \mathbf{u}_{FF}$ を用いて(8)式を展開すると(9)式となる。なお、減衰項の振動モード間での連成は無視する。

$${}_s \ddot{\mathbf{y}} + 2{}_s h_s \omega_{FF,s} \dot{\mathbf{y}} + {}_s \omega_{FF,s}^2 \mathbf{y} + \frac{{}_s \mathbf{u}_{FF,s} \mathbf{u}_{FF,1}^T \cdot Q_{iso}}{{}_s \mathbf{u}_{FF,s}^T \cdot \mathbf{M} \cdot {}_s \mathbf{u}_{FF}} = -{}_s \Gamma_{FF,s} \mathbf{u}_{FF} \cdot \ddot{y}_g \quad (9)$$

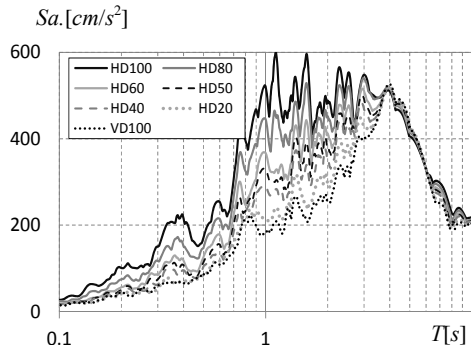


図7 免震層の相対加速度スペクトル

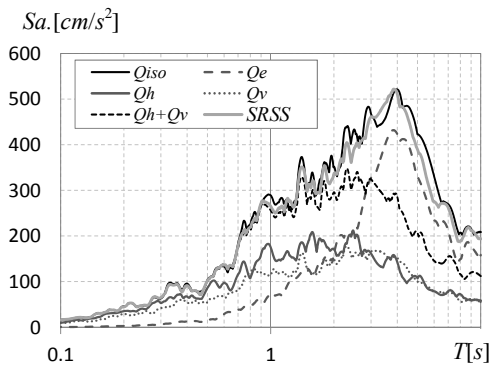
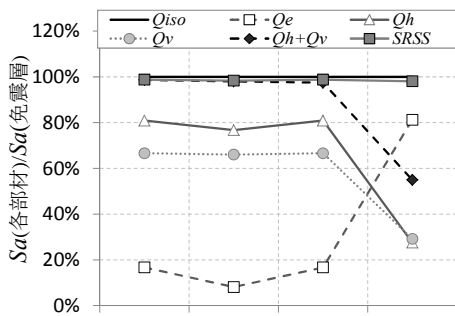


図8 部材別の加速度スペクトル



両端4次 両端3次 両端2次 免震周期
図9 免震層に対する割合

これらの相対加速度応答スペクトルより算出した高次モードの加速度応答分布を図10に示す。ここで、比較としてダンパーなしの場合の分布も示している。ダンパーなしでは、2次と3次のモード応答は極めて小さく、ダンパーを加えることによって短周期帯のスペクトルが増すことから高次モード応答が励起されることになる。また履歴分のみ(HD100)に対して速度依存型が少量でも加わった際の高次モードの変動が大きいことが認められ、既往研究による知見とも整合する。

図11に示す(13)式から(15)式によるせん断力係数においても(a)時刻歴と(b)SRSSの対応は良好である。(c)提案式においては、応答値をやや大きめに設定する傾向だが、(d)時刻歴に対する倍率で見れば全体的な分

布の平均値を捉えられている。以上より、本研究課題で提案する非線形モーダルアナリシスおよびせん断力係数の評価式が妥当であることが確認される。

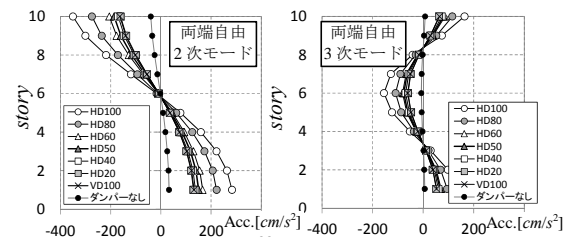
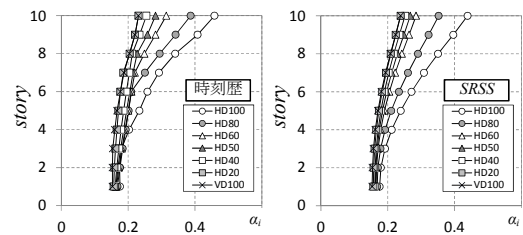


図10 各次モードの応答加速度分布



(a)時刻歴応答

(b)SRSS

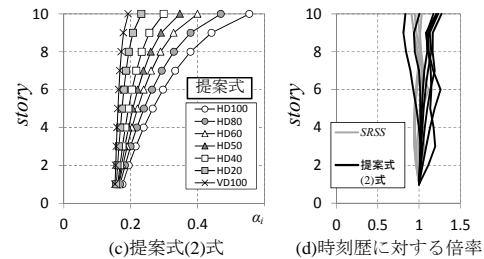


図11 せん断力係数分布

(4)まとめ

本研究課題では、免震告示の過小評価を改善する免震建物の新たな設計用せん断力係数分布の評価式を提案した。本評価法は、ダンパーの種別を問わず、上部構造での応答増幅作用の変動を連続的かつ定量的に捉えられ実務的にも有効性の高い評価式といえる。さらに免震建物における高次モード応答の影響度を分析し、提案した増幅率は高次モード応答によるせん断力係数の増幅を適切に評価しており、評価式の妥当性が確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 小林正人、谷崎豪、松田紳吾、免震部材の多様化に対応した免震建物の設計用地震荷重分布、日本建築学会構造系論文集、査読有、第676号、pp. 859-868、2012. 6

〔学会発表〕(計13件)

- ① Masahito KOBAYASHI、Shingo MATSUDA、
A Study on Vertical Distribution of
Shear Force Coefficient for Seismic
Design of Seismically Isolated
Buildings、The 15th World Conference
on Earthquake Engineering、2012. 9. 24
～2012. 9. 28、Lisbon、Portugal
- ② 納所昌広、松田紳吾、小林正人、免震建
物の設計用地震荷重に関する研究（その
6）設計用地震荷重分布が各種構造部材
に及ぼす影響分析、第9回日本地震工学
学会大会、2012. 11. 9、東京・国立オリ
ンピック記念青少年総合センター
- ③ 松田紳吾、小林正人、免震建物の設計用
地震荷重に関する研究（その5）提案式
の簡略化、第9回日本地震工学学会大会、
2012. 11. 8～2012. 11. 9、東京・国立オリ
ンピック記念青少年総合センター
- ④ 小林正人、谷崎豪、松田紳吾、内野雄元、
免震建物の設計用地震荷重に関する研
究（その4）実建物を想定した応答評価
の比較、第8回日本地震工学学会大会、
2011. 11. 12、東京・国立オリンピッ
ク記念青少年総合センター
- ⑤ 内野雄元、谷崎豪、松田紳吾、小林正人、
免震建物の設計用地震荷重に関する研
究（その3）応答予測精度に及ぼす各種
変動因子の影響、第8回日本地震工学
学会大会、2011. 11. 12、東京・国立オリ
ンピック記念青少年総合センター
- ⑥ 松田紳吾、谷崎豪、内野雄元、小林正人、
免震建物の設計用地震荷重に関する研
究（その2）応答増幅に及ぼす高次モ
ード応答の影響分析、第8回日本地震工
学会大会、2011. 11. 12、東京・国立オリ
ンピック記念青少年総合センター
- ⑦ 谷崎豪、松田紳吾、内野雄元、小林正人、
免震建物の設計用地震荷重に関する研
究（その1）設計用層せん断力係数分布
の評価、第8回日本地震工学学会大会、
2011. 11. 12、東京・国立オリンピッ
ク記念青少年総合センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 正人 (KOBAYASHI MASAHIITO)
 明治大学・理工学部・准教授
 研究者番号：50373022

(2) 研究分担者

()
 研究者番号：

(3) 連携研究者

()
 研究者番号：